



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ MASCENA DANTAS

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA COMUNIDADES ISOLADAS UTILIZANDO
ULTRACAPACITORES PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

FORTALEZA
2012

JOSÉ MASCENA DANTAS

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA COMUNIDADES ISOLADAS UTILIZANDO
ULTRACAPACITORES PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Marcos Tavares Cruz

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- D213s Dantas, José Mascena.
 Sistema fotovoltaico para comunidades isoladas utilizando ultracapacitores para
 armazenamento de energia / José Mascena Dantas. – 2012.
 107 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento
de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos.
 Orientação: Prof. Dr. Cícero Marcos Tavares Cruz.
1. Engenharia Elétrica. 2. Energia – Fontes alternativas. I. Título.

A Jesus Cristo, meu Senhor e Salvador.

*Aos meus pais José Félix e Maria do Socorro
Dantas que acreditaram em mim.*

*Aos meus tios-pais Cândido Lúcio (in
memoriam) e Josefa Trigueiro que me
educaram em Campina Grande-PB.*

*À minha esposa e grande amor Mary Luce,
pela ausência no lar durante os estudos e pelo
incentivo sem o qual eu não teria chegado ao
final com a coroa.*

*Aos meus filhos Aryadne, Ariele e José Neto
que tiveram discernimento e compreensão.
Que acompanham a minha trajetória de vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao Rei dos Reis e Senhor dos Senhores, Jesus Cristo, o nazareno, que morreu na cruz do Calvário para que nós todos tivéssemos vida, e vida em abundância.

Ao Reitor do Instituto Federal do Piauí, Prof. Francisco das Chagas Santana, um verdadeiro nacionalista, que contribui para o desenvolvimento científico e tecnológico do Estado do Piauí.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC: Otacílio da Mota Almeida, Luiz Henrique Colado Silva Barreto, José Carlos Teles Campos, Demercil de Sousa e Arthur Sousa.

Ao Prof. René Pastor Torrico Bascopé que não mediu esforços em colaborar nos momentos de dúvidas durante a montagem do projeto.

Ao Prof. Cícero Marcos Tavares Cruz, não só por sua segura e competente orientação, dedicação, pelo exemplo de profissionalismo como também por sua amizade, seu incentivo, sua paciência, enfim, pelo exercício de educador e formador de mentes críticas demonstradas durante a orientação deste trabalho, transmitido sempre de forma clara e precisa os seus conhecimentos. Agradeço imensamente a confiança em mim depositada.

Ao Prof. Fernando Antunes que não só contribuiu para o meu desenvolvimento científico, mas que se tornou um amigo.

Ao professor Sérgio Daher pela amizade e colaboração nas discussões profissionais.

Aos professores Otacílio da Mota Almeida e Raphael Amaral membros da banca examinadora que contribuíram em muito para o aprimoramento do trabalho em sua versão final.

Aos meus companheiros de Mestrado: Guilherme Medeiros Barçante, Paulo de Tarso Vilarinho Castelo Branco, Francisco das Chagas Batista Santos, Emanuel Augusto Paulo Soares, Aurélio Agostinho Adão, Francisco Nogueira, Kelson Leite, Nádia Mendes, Dênis Alfredo Costa e Silva, Benedicto Reinaldo Neto e José Brito Filho.

Ao meu amigo Jaison Castro Sousa que me recebeu em seu apartamento todas às vezes que estive em Fortaleza.

Aos técnicos de laboratório do GPEC, Pedro Augusto e André Gadelha, pelas contribuições práticas e pela amizade.

Aos meus colegas do LCE e do GPEC: Hermínio Miguel, Samuel Jó de Mesquita, Derivan Marques, Dante Pereira, João Silva, Eduardo Façanha [jovem cientista 2011],

Joacillo Dantas, Luiz Daniel, Francisco Júnior, Lisonildo Castro e Ailton Leão Júnior por todo apoio, incentivo, conhecimentos técnicos e companheirismo em todas as etapas vencidas.

Ao amigo e companheiro Jaislan Honório Monteiro pela revisão deste trabalho.

Ao Prof. Kennedy Rolim por suas contribuições no acompanhamento deste projeto.

A minha esposa Mary Luce que me apoiou em todos os momentos, incentivando e acreditando sempre em minha capacidade com amor e paciência.

Aos meus filhos amados Aryadne, Ariele e José Mascena Dantas Neto e a todas as pessoas que por motivo de esquecimento não foram citadas anteriormente, vou deixando neste espaço minhas sinceras desculpas e meus agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta a concepção, projeto e implementação de um conversor CC/CC elevador para interligar um painel fotovoltaico a um banco de ultracapacitores para armazenamento de energia em substituição às baterias automotivas convencionais. Na saída dos ultracapacitores utiliza-se um conversor CC/CC abaixador, que fornece essa energia a um sistema de telecomunicação para suprimento de um transceptor monocanal visando ao atendimento do serviço de telefonia rural/Internet em comunidades isoladas da rede pública de energia. O sistema pode suprir o serviço de comunicação para uma comunidade isolada da rede de energia elétrica por até três horas no período noturno, quando utilizado um equipamento rádio com cabos, conectores e antena para transmissão e recepção de sinal de telefonia com potência de consumo de 13 W e com radiação solar média de $5.500 \text{ W/m}^2/\text{dia}$. Durante o dia, a energia solar é capturada por um painel fotovoltaico e armazenada em ultracapacitores através de um conversor *boost*. Este conversor possibilita a carga dos ultracapacitores no ponto de máxima potência (MPP) do painel fotovoltaico. O transceptor é ativado quando se tira o fone do gancho e a alimentação do sistema vem do painel via ultracapacitores. Caso haja ligações durante o dia, o painel fotovoltaico supre as necessidades do equipamento transceptor. À noite, o painel utilizado não gera energia suficiente para alimentar o sistema de telecomunicação. No período noturno, caso ocorra uma chamada telefônica para o sistema proposto, o transceptor será acionado, o assinante deverá retirar o monofone do gancho do aparelho telefônico para realizar o atendimento. Durante essa operação o transceptor consome aproximadamente 13 W de potência, que é fornecida pelos ultracapacitores, os quais estão interligados através do conversor *buck*. O sistema proposto é controlado por um microcontrolador e um circuito de controle, que procura o ponto de máxima potência (MPP) do painel fotovoltaico, monitora o nível da tensão dos ultracapacitores e determina o tempo de funcionamento do conversor CC/CC, que possibilita o fornecimento de energia para o transceptor pelos ultracapacitores.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico. Comunidades isoladas. Sistema de telecomunicação. Ultracapacitor. Conversores elevador e abaixador. Microcontrolador. Transceptor.

ABSTRACT

This work presents the conception, design and implementation of a DC/DC boost converter to connect a photovoltaic panel to a bank of ultracapacitors for energy storage to replace the conventional automotive batteries. In the output of ultracapacitors a DC/DC step-down converter is used. This converter provides power to a telecommunication system for the supply of a single channel transceiver with the purpose of providing the services of rural telephony and Internet in isolated communities from the public energy grid. The system can provide the communication service to a isolated community from the power grid for up to three hours at night when used with radio equipment with cables, connectors and antenna for transmitting and receiving phone signal with consumption power of 13 W and with solar radiation rate of $5.500 \text{ W/m}^2/\text{day}$. During the day solar energy is captured by a photovoltaic panel and stored in ultracapacitors through a boost converter. This converter enables ultracapacitors to charge at the maximum power point (MPP) of the photovoltaic panel. The transceiver is activated when the phone is taken off the hook and the system power comes from the panel via ultracapacitors. If there are calls during the day, the photovoltaic panel meets the needs of the transceiver. At night, the panel used does not generate enough energy to power the telecommunication system. At night, if there is a phone call to the proposed system, the transceiver will be triggered, and the subscriber should take the handset off the hook to answer an incoming call. During this operation, the transceiver consumes approximately 13 W of power, which is provided by ultracapacitors that are interconnected through the buck converter. The proposed system is controlled by a microcontroller and a control circuit which tracks the maximum power point (MPP) of the photovoltaic panel, monitors the voltage level of ultracapacitors and determines the operating time of the DC/DC converter which enables the provision of power to the transceiver by the ultracapacitors.

Keywords: Photovoltaic panel. Isolated communities. Telecommunication systems. Rural telephony. Ultracapacitor. Boost and buck converters. Microcontroller. Transceiver.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
1 ESTADO DA ARTE DA ENERGIA SOLAR.....	3
1.1 Introdução.....	3
1.2 Comunidades isoladas sem rede de energia e de telecomunicações.....	4
1.3 O porquê de atender as comunidades isoladas sem redes de energia e de telecomunicações.....	8
1.4 Custo para se levar energia até as comunidades isoladas	9
1.5 Sistema proposto.....	13
1.6 Conclusão.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
2 COMPONENTES DO SISTEMA: PAINEL FOTOVOLTAICO, CONVERSORES, ULTRACAPACITORES E TRANSCEPTOR.....	15
2.1 Célula Fotovoltaica.....	15
2.2 Painel Fotovoltaico.....	20
2.3 Ultracapacitores.....	22
2.3.1 Comparações entre Baterias x Ultracapacitores.....	37
2.4 Transceptor	40
2.4.1 Funcionamento do transceptor.....	40
2.5 Revisão Bibliográfica dos Conversores.....	42
2.5.1 Conversores CC-CC.....	42
2.5.2 Conversor <i>Boost</i>	43
2.5.3 Topologia do Conversor Elevador.....	46
2.6 Técnicas de MPPT.....	47
2.6.1 Método da Perturbação e Observação (P&O)	49
2.6.2 Método da Razão Cíclica Fixa	53
2.6.3 Método da Tensão Constante	53
2.6.4 Método da Corrente Constante	55
2.6.5 Método da Condutância Incremental	56
2.6.6 Método <i>Hill Climbing</i> (HC)	59
2.7 Conversor <i>Buck</i>	61
2.7.1 Topologia do Conversor Abaixador.....	63
2.8 Conclusão.....	63
CAPÍTULO 3.....	64
3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	64
3.1 Introdução.....	64
3.2 Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico.....	64
3.3 Dimensionamento do Elemento Armazenador.....	67

3.4	Dimensionamento e Simulação do Conversor <i>Boost</i>	73
3.3.1	Dimensionamento do indutor <i>boost</i>	73
3.3.2	Dimensionamento do capacitor <i>CI</i>	76
3.4	Dimensionamento e Simulação do Conversor <i>Buck</i>	79
3.4.1	Dimensionamento do indutor <i>buck</i>	83
3.5	CIRCUITO DE CONTROLE E ALGORITMO.....	86
3.5.1	Algoritmo de MPPT.....	86
CAPÍTULO 4.....		89
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....		89
4.1	Protótipo montado	89
CONCLUSÃO GERAL.....		97
REFERÊNCIAS.....		100
APÊNDICES.....		105
APÊNDICE A - Esquemático do Circuito de Controle desenhado com o <i>software</i> <i>Altium</i>		105
APÊNDICE B - Esquemático do circuito de potência e da fonte auxiliar.....		106
APÊNDICE C - Esquemático do banco de ultracapacitores.....		107

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	–	Projeção de custos futuros.....	4
Figura 1.2	–	Jangada com orelhão celular em Maceió (AL).....	5
Figura 1.3	–	Usuário usando tecnologia GSM e energia solar no Lago Vitória, em Uganda.....	5
Figura 1.4	–	Usuário em orelhão da Oi beneficiado pela captação de energia solar, região do semiárido (PI)	5
Figura 1.5	–	Orelhão via satélite da Embratel usando energia fotovoltaica na localidade Melancias, em São Francisco do Piauí (PI).....	6
Figura 1.6	–	Sistema de telefonia pública utilizando energia fotovoltaica em Maceió-AL.....	6
Figura 1.7	–	Painel solar e antena sendo instalados na comunidade rural Tucuns dos Donatos em Pedro/PI.....	7
Figura 1.8	–	Números absolutos de exclusão elétrica rural por Estado da Federação.....	10
Figura 1.9	–	Diagrama de blocos do sistema proposto.....	13
Figura 2.1	–	Camada do tipo P e camada do tipo N da célula solar.....	16
Figura 2.2	–	Efeito fotovoltaico na junção P-N.....	17
Figura 2.3	–	Esquemático de uma célula fotovoltaica de silício.....	17
Figura 2.4	–	Tipos de células fotovoltaicas: a) silício monocristalino b) silício policristalino c) película fina.....	19
Figura 2.5	–	Painel fotovoltaico utilizado no experimento.....	20
Figura 2.6	–	Representação dos nanotubos de carbono.....	23
Figura 2.7	–	O nanotubo semicondutor é encapsulado pelo polímero, criando uma tinta eletrônica.....	25
Figura 2.8	–	O nanotubo pesquisado pela equipe do Dr. Rauge que vislumbra um carro elétrico no qual a bateria estaria distribuída por todo o veículo, incluindo chassi, portas, teto, piso, etc.	26
Figura 2.9	–	Estrutura de um nanotubo de prata com seção quadrada. Todos os nanotubos conhecidos até agora eram realmente tubos, redondos.....	27
Figura 2.10	–	Corte transversal de um ultracapacitor.....	29
Figura 2.11	–	Nanotubo de carbono sobre folha de níquel.....	30
Figura 2.12	–	Baterias, ultracapacitores e capacitores comuns.....	30
Figura 2.13	–	Capacitor eletrolítico comum e ultracapacitor.....	31
Figura 2.14	–	Capacitores e ultracapacitores.....	31
Figura 2.15	–	Módulo esquemático do ultracapacitor.....	33
Figura 2.16	–	Mapa comparativo de características de densidade de potência e de energia de diferentes dispositivos de acúmulo.....	34
Figura 2.17	–	Separação de carga no ultracapacitor.....	36
Figura 2.18	–	Exemplo de um circuito PWM.....	43
Figura 2.19	–	Conversor elevador de tensão (<i>boost</i> clássico)	44
Figura 2.20	–	Tensão sobre o indutor do <i>boost</i>	44
Figura 2.21	–	Principais formas de onda do conversor <i>boost</i>	45
Figura 2.22	–	Apresentação gráfica da característica de transferência do conversor <i>boost</i>	46
Figura 2.23	–	Representação dos pontos de operação de um painel fotovoltaico.	48
Figura 2.24	–	Diagrama de blocos simplificado do MPPT.....	49
Figura 2.25	–	Fluxograma do Algoritmo do Método Perturbação & Observação	50

Figura 2.26	– Evoluções possíveis da potência num painel fotovoltaico.....	51
Figura 2.27	– Mudança repentina do ponto de operação devido às alterações climáticas.....	52
Figura 2.28	– Modelo do método da Tensão Constante.....	53
Figura 2.29	– Fluxograma do método de Tensão Constante.....	54
Figura 2.30	– Fluxograma do Método Corrente Constante.....	56
Figura 2.31	– Gráfico da curva Tensão x Potência para o Método Condutância Incremental.....	57
Figura 2.32	– Fluxograma do Método Condutância Incremental.....	58
Figura 2.33	– Algoritmo do MPPT do Método <i>Hill Climbing</i>	59
Figura 2.34	– Conversor <i>Buck</i>	61
Figura 2.35	– Tensão $V_{D_{buck}}$ no conversor <i>buck</i>	61
Figura 2.36	– Ganho estático em função da razão cíclica	62
Figura 2.37	– Principais formas de onda do conversor <i>buck</i>	62
Figura 3.1	– Representação dos pontos de operação do painel fotovoltaico M55 da Siemens.....	65
Figura 3.2	– Curva de Potência e corrente em função da tensão no painel fotovoltaico.....	66
Figura 3.3	– Relação da constante de tempo RC.....	69
Figura 3.4	– Resposta em frequência para capacitância e resistência com ultracapacitor de 350 F.....	69
Figura 3.5	– Curvas de corrente de descarga no ultracapacitor.....	70
Figura 3.6	– Perfil da curva de descarga no ultracapacitor.....	71
Figura 3.7	– Circuito do <i>ORCAD CAPTURE 10.3</i> utilizado para simular o módulo fotovoltaico.....	72
Figura 3.8	– Circuito utilizado para simulação do conversor <i>boost</i> no <i>ORCAD CAPTURE 10.3</i>	77
Figura 3.9	– Tensão no módulo fotovoltaico.....	77
Figura 3.10	– Corrente no módulo fotovoltaico.....	77
Figura 3.11	– Ondulação da corrente de carga nos ultracapacitores.....	78
Figura 3.12	– Corrente no indutor do conversor <i>boost</i>	78
Figura 3.13	– Tensão no interruptor do conversor <i>boost</i>	79
Figura 3.14	– Circuito utilizado para simulação do conversor <i>buck</i> no <i>ORCAD CAPTURE 10.3</i>	82
Figura 3.15	– Tensão nos ultracapacitores na entrada do conversor <i>buck</i> com <i>ORCAD CAPTURE 10.3</i>	83
Figura 3.16	– Tensão na chave de entrada do conversor <i>buck</i> com <i>ORCAD CAPTURE 10.3</i>	83
Figura 3.17	– Rotina para obtenção do ponto de máxima potência.....	87
Figura 3.18	– Processo de carga dos ultracapacitores.....	88
Figura 4.1	– Foto do protótipo implementado.....	89
Figura 4.2	– Circuito de Potência - Conversores <i>Boost</i> (esquerda) e <i>Buck</i> (direita).	90
Figura 4.3	– Circuito de Controle do Sistema.....	90
Figura 4.4	– Medida do indutor do <i>boost</i>	91
Figura 4.5	– Medida do indutor do <i>buck</i>	91
Figura 4.6	– Transceptor ativado e telefone com monofone no gancho.....	92
Figura 4.7	– Análise espectral do transceptor sem sinal da portadora com monofone no gancho.....	92

Figura 4.8	– Transceptor ativado com chamada telefônica em andamento e monofone fora do gancho.....	93
Figura 4.9	– Análise espectral da onda portadora do transceptor ativado na frequência de 259,066 MHz.....	93
Figura 4.10	– Diagrama de blocos do sistema montado no projeto.....	94
Figura 4.11	– Tensão na chave e corrente no indutor do <i>Boost</i> . (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 1 A/Div).....	94
Figura 4.12	– Tensão e corrente na carga do conversor <i>Boost</i> . (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 250 mA/Div).....	94
Figura 4.13	– Tensão na chave e corrente no indutor do <i>Buck</i> . (Canal 1: 5 V/div, Canal 2: 250 mA/div).....	95
Figura 4.14	– Tensão e corrente na carga do conversor <i>buck</i> . (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 250 mA/Div).....	95
APÊNDICE A	– Esquemático do Circuito de Controle desenhado com o <i>software Altium</i>	105
APÊNDICE B	– Esquemático do circuito de potência e da fonte auxiliar.....	106
APÊNDICE C	– Esquemático do banco de ultracapacitores.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Custos de Instalação e de Geração de Energia de Fontes Renováveis.....	11
Tabela 2	–	Comparação de preços de ultracapacitores 2,7 V 350 F por fabricante.....	37
Tabela 3	–	Comparações entre Ultracapacitores x Baterias.....	39
Tabela 4	–	Comparação bateria x ultracapacitor.....	39
Tabela 5	–	Resumo do Algoritmo Perturbação e Observação.....	51
Tabela 6	–	Comparação entre os métodos MPPT.....	60
Tabela 7	–	Características elétricas do módulo M55 da Siemens.....	65
Tabela 8	–	Especificações para o dimensionamento do conversor <i>boost</i>	73
Tabela 9	–	Características do núcleo NEE-42/21/20.....	74
Tabela 10	–	Características físicas do indutor <i>boost</i>	75
Tabela 11	–	Especificações para o dimensionamento do conversor <i>buck</i>	79
Tabela 12	–	Características do núcleo NEE-40/17/12.....	84
Tabela 13	–	Características físicas do indutor <i>buck</i>	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
η	Rendimento	%
ΔI_{PV}	Ondulação de corrente de entrada do <i>boost</i>	A
ΔI_{L_buck}	Ondulação de corrente na entrada do indutor do <i>buck</i>	A
ΔV_{carga}	Variação de tensão na saída do <i>boost</i>	V
ΔV_{buck}	Variação de tensão na entrada do <i>buck</i>	V
ΔV_{C_buck}	Ondulação de tensão de saída do <i>buck</i>	V
ΔV_{PV}	Variação de tensão na entrada do <i>boost</i>	V
A_e	Área efetiva da perna central do núcleo	cm ²
$A_e.A_w$	Produto das áreas	cm ⁴
$A_{fiobuck}$	Área total do condutor do <i>buck</i>	cm ²
A_{fio}	Área total do condutor do indutor do conversor <i>boost</i>	cm ²
A_{hd}	Capacidade média de geração fornecida pelo módulo fotovoltaico em um dia	Ah
A_{hL}	Consumo diário da carga	Ah
A_w	Área da janela do carretel	cm ²
B_{max}	Densidade de fluxo magnético	T
C	Capacitância	F
C_{cells}	Quantidade de células de ultracapacitores que são ligados em série	-
C_{sys}	Sistema de capacitâncias	F
C_{UC}	Capacitância equivalente dos ultracapacitores	F
C_{ultra}	Capacidade total dos ultracapacitores	Ah
C_1	Capacitor de entrada do conversor <i>boost</i> em paralelo com o painel	F
C_{Buck}	Capacitor de saída do conversor <i>buck</i>	F
$C_{mín}$	Capacitor de filtragem do conversor <i>buck</i>	F
d	Dias de autonomia	Dias
D	Razão cíclica	-

Símbolo	Significado	Unidade
D'	Complemento da razão cíclica	-
D_{max}	Razão cíclica máxima para o conversor <i>boost</i>	-
Dmáx	Ciclo de carga máximo para o conversor <i>buck</i>	-
Dmín	Ciclo de carga mínimo para o conversor <i>buck</i>	-
D[n]	Razão cíclica amostrada	-
D_{boost}	Diodo do <i>boost</i>	-
D_{buck}	Diodo do <i>buck</i>	-
Dc	Máxima profundidade de descarga	%
dt	Tempo de execução desejado	s
dq	Elemento de carga de uma placa	-
dW	Trabalho	J
Earm	Energia armazenada pelos ultracapacitores	J
ESR	Resistência Série Equivalente	Ω
ESRmáx	Resistência série máxima do capacitor	Ω
Fs	Frequência de comutação da rede	Hz
f_{Sboost}	Frequência de comutação no <i>boost</i>	Hz
f_{Sbuck}	Frequência de comutação no <i>buck</i>	Hz
Icarga	Corrente nominal da carga fornecida pelo fabricante	A
I	Corrente média	A
Icurto	Corrente de curto-circuito (corrente máxima)	A
IL_{1ef}	Corrente eficaz que circula pelo enrolamento do indutor <i>boost</i>	A
IL_{1pico}	Corrente de pico do indutor do <i>boost</i>	A
IL_{2ef}	Corrente eficaz que circula pelo indutor <i>buck</i>	A
IL_{2pico}	Corrente de pico através do indutor <i>buck</i>	A
I_{MPP}	Corrente nominal do painel fotovoltaico	A
I_{PV_NOM}	Corrente nominal do módulo fotovoltaico	A
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	A
Jmax	Densidade de corrente elétrica máxima	A/cm^2
Io	Corrente nominal de saída do conversor <i>buck</i>	A
Iph	Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico	A

Símbolo	Significado	Unidade
K_2	Constante de proporcionalidade	-
K_w	Fator de utilização da área da janela	-
L_{boost}	Indutor do <i>boost</i>	H
L_{buck}	Indutor do <i>buck</i>	H
l_g	Entreferro total do indutor do <i>boost</i>	cm
$l_{g_{buck}}$	Entreferro total do indutor do <i>buck</i>	cm
N_{esp}	Número de espiras do enrolamento do indutor	-
$N_{fios\_paralelos}$	Número de fios paralelos para o indutor	-
$N_{fios\_paralelos\_buck}$	Número de fios paralelos para o indutor do <i>buck</i>	-
N_p	Quantidade de painéis solares do projeto	-
MCC	Modo de condução contínua	-
MCD	Modo de condução descontínua	-
MPP	Ponto de máxima potência do painel fotovoltaico	-
P_{max}	Potência máxima	W
P_{UCmed}	Potência média fornecida pelo banco de ultracapacitores	W
P_o	Potência nominal de saída do conversor <i>buck</i>	W
P_{out}	Potência consumida pela carga	W
PWM	Modulação por largura de pulso	-
-q	Carga negativa	-
+q	Carga positiva	-
R	Resistência de carga	Ω
R_{med}	Radiação média diária (Fortaleza: 5500 W/m ² /dia)	W/m ² /dia
R_{PM}	Resistor paralelo ao painel fotovoltaico	Ω
RS	Radiação solar padrão	1.000 W/m ²
R_{SE}	Resistência série equivalente	Ω
R_{SM}	Resistor série com o painel fotovoltaico	Ω
R_{SE_Buck}	Resistência série do capacitor do <i>buck</i>	Ω
$ReqESR_{máxBuck}$	Resistência série equivalente máxima do conversor <i>buck</i>	Ω

Símbolo	Significado	Unidade
S_{buck}	Chave do <i>buck</i>	-
T_{on}	Intervalo de Condução	s
T_s	Intervalo de comutação	s
t_{func}	Tempo de funcionamento da carga por dia	h/dia
V	Diferença de potencial entre placas de um capacitor	V
V_{aberto}	Tensão em aberto do painel (tensão máxima)	V
V_c	Tensão de saída do <i>buck</i>	V
$V_{e\_mín}$	Tensão mínima na entrada do barramento do conversor <i>buck</i>	V
V_{max}	Tensão máxima fornecida pelo banco de ultracapacitores	V
V_{min}	Tensão mínima de trabalho	V
V_{carga}	Tensão na saída do conversor <i>buck</i>	V
V_{carga_max}	Tensão máxima na saída do conversor <i>boost</i> (tensão máxima nos ultracapacitores)	V
V_{cc}	Tensão de saída do barramento do <i>buck</i>	V
V_D	Tensão de polarização do diodo	V
V_{DBuck}	Tensão no diodo do conversor <i>buck</i>	V
V_g	Tensão máxima de entrada do barramento do conversor <i>buck</i>	V
$V_{LR}(t)$	Tensão no indutor LR	V
V_{LBuck}	Tensão média sobre o indutor do conversor <i>buck</i>	V
V_{MPP}	Tensão nominal (tensão no ponto de máxima potência)	V
V_{OC}	Tensão de circuito-aberto	V
V_{PV}	Tensão no painel fotovoltaico	V
Φ	Diâmetro do fio do indutor	cm
δ	Profundidade de penetração da corrente no condutor do conversor <i>boost</i>	cm
V_{PV_MIN}	Tensão mínima de entrada no <i>boost</i>	V
V_{PV_NOM}	Tensão nominal na entrada do <i>boost</i>	V

Introdução Geral

As novas tecnologias na área das fontes renováveis de energia, têm se caracterizado nos últimos anos como fatores importantes no desenvolvimento do setor. Os sistemas fotovoltaicos desde 1980, eólicos e de biomassa têm aumentado a eficiência e, conseqüentemente, tornado-se economicamente mais viáveis. Estes sistemas têm funcionado de diversas formas e potências em várias partes do mundo com bastante sucesso. As tecnologias para uso de energias renováveis, não podem mais ser consideradas como soluções alternativas, dentro do contexto global econômico e de uso racional da energia [1].

As vantagens apresentadas com o uso da energia solar fotovoltaica são muitas, dentre as quais se podem destacar extrema simplicidade, ausência de peças mecânicas móveis, característica modular, reduzidos prazos para instalação, alto grau de confiabilidade dos sistemas instalados e baixa manutenção. Desta forma, o sistema solar fotovoltaico caracteriza-se como importante fonte de energia, que não polui o meio ambiente e que é uma fonte renovável de energia bastante adequada ao meio urbano, reduzindo quase que completamente as perdas por transmissão da energia devido à proximidade entre geração e consumo [2].

Historicamente, a geração e a distribuição da energia elétrica estão associadas à necessidade de luz, porém a força motriz é a maior dependente da continuidade do serviço de fornecimento. Em 2001, o povo brasileiro foi obrigado a economizar energia, devido à crise energética ocorrida com a falta de investimentos em infraestrutura pelo governo federal, hoje a situação não é diferente.

Os sistemas fotovoltaicos isolados ou autônomos, em geral, atendem a locais isolados ou não conectados à rede elétrica de distribuição. Este caso não é genérico, pois sinais de trânsito podem ser conectados à fonte de suprimento fotovoltaico. No caso específico, deste estudo, analisar-se-á a implementação de um sistema de telecomunicação em áreas distantes da rede.

A necessidade de instalação e operação do sistema com o uso de ultracapacitores, como forma de armazenamento de energia, constitui-se uma alternativa promissora para substituir as baterias automotivas mais pesadas, mais caras e com tempo de vida útil menor por ultracapacitores que são menores fisicamente, mas com vida útil de 10 anos para atendimento a comunidades isoladas da rede pública de energia elétrica e da rede de telecomunicações, o que resolve a limitação de espaço e durabilidade.

Procurando contribuir neste sentido, essa dissertação está dividida como segue: No capítulo I apresenta-se uma rápida abordagem sobre as principais necessidades de se instalar esses sistemas em comunidades isoladas dos serviços públicos de energia e telecomunicações. É feita uma indagação em como proceder para atender as comunidades isoladas sem redes de energia e de telecomunicações e os custos para se levar energia e comunicação até uma comunidade longe dos centros urbanos e afastada da rede de distribuição de energia.

No capítulo II é mostrado um estudo sobre o painel fotovoltaico, os ultracapacitores utilizados, os conversores empregados no controle do sistema e na alimentação da carga. A partir deste estudo é analisado o uso dos ultracapacitores no Brasil, e por estarem sendo utilizados em grandes escalas em projetos que substituem o uso das baterias por esses componentes, em países tais como os Estados Unidos, Japão, Alemanha, Coreia do Sul, dentre outros. Em seguida é feito um comparativo de armazenamento de energia entre as baterias e os ultracapacitores.

O capítulo III traz o dimensionamento do sistema a ser usado durante o trabalho, o equacionamento para determinar os parâmetros do circuito, as etapas de operação e os resultados das simulações realizadas.

O capítulo IV apresenta o circuito projetado e os resultados experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido.

Para finalizar o estudo, as conclusões finais do projeto são apresentadas.

CAPÍTULO 1

1 ESTADO DA ARTE DA ENERGIA SOLAR

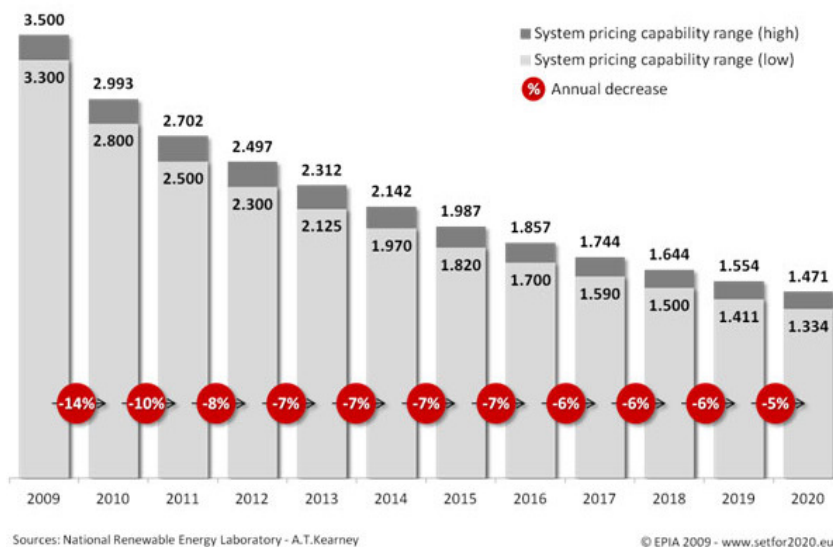
1.1 Introdução

A necessidade do ser humano em usar a energia para suas atividades diárias remonta de tempos passados. Atualmente a energia elétrica em particular tornou-se uma modalidade de energia fundamental para todos os ramos de atividade seja ela industrial comercial ou residencial. Com isto o uso da energia elétrica se expandiu tornando-se necessário a normatização e a regulamentação do setor. O mercado de energia elétrica tornou-se propulsor de grandes empreendimentos voltados não somente para o grande consumidor como também para o pequeno consumidor. A busca pelo pequeno consumidor, hoje motivado por várias campanhas governamentais será em um futuro próximo, a última milha promissora e carente de investimento. É neste contexto que se insere este trabalho, na busca pelo consumidor remoto que se conectará ao negócio de energia na forma sem fio “wireless”. Duas fontes de energia se destacam neste cenário a energia eólica e a solar.

Neste tópico será traçado um paralelo dando ênfase às vantagens das duas principais fontes alternativas de energia mais utilizadas no momento em todo o mundo, quais sejam: a Eólica e a Solar. Para a sociedade em geral a energia eólica é inesgotável, não emite gases poluentes nem gera resíduos, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa. Nas comunidades onde se encontram inseridos os parques eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado, gerando a criação de emprego e renda, com benefícios financeiros diretos para os proprietários de terras na qual são inseridos. Para o Estado reduz a elevada dependência energética do exterior, nomeadamente a dependência em combustíveis fósseis, e aumento do crédito de carbono devido à poupança à menor aquisição de direitos de CO₂ por cumprir o Protocolo de Kyoto e as diretivas comunitárias, também por ser uma das fontes mais baratas de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais.

A cada dia os painéis solares ficam mais potentes e seu custo de produção vem diminuindo, tornando cada vez mais a energia solar uma solução economicamente viável, em termos de investimento. O gráfico da Figura 1.1 mostra a projeção de custos de produção do painel solar.

Figura 1.1 – Projeção de custos futuros.



Em comunidades isoladas da rede convencional de energia, a energia solar é uma alternativa excelente em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a investimentos em linhas de transmissão.

1.2 Comunidades isoladas sem redes de energia e de telecomunicações

Os sistemas fotovoltaicos domésticos isolados são aqueles designados para aplicações nas quais a energia convencional não está disponível para uso. Eles fornecem eletricidade às residências e que, como o próprio nome já diz, não estão conectados à rede de distribuição de eletricidade da concessionária local. Estes sistemas, na maioria das vezes, atendem às comunidades isoladas, fornecendo energia elétrica de baixa tensão, em sua maior parte, para iluminação, comunicação, refrigeração e outras cargas de menor consumo de energia.

Os sistemas fotovoltaicos não domésticos isolados foram as primeiras aplicações comerciais. Esses sistemas fornecem energia para uma ampla escala de aplicações, tais como em telecomunicação, refrigeração de medicamentos e vacinas em postos de saúde, bombeamento de água e outros [3].

Os sistemas de telecomunicações alimentados por energia fotovoltaica são encontrados também em telefonia para locais isolados, estações móveis de telecomunicações, telemetria, pequenas centrais telefônicas, rádio ou TV VHF/UHF.

Nas regiões de difícil acesso e em comunidades isoladas onde não há energia elétrica, torna-se praticamente impossível terem a seu alcance um meio de comunicação. Com

a aplicação da energia fotovoltaica, esse fato, pode ser uma realidade. Existem telefones públicos, já em funcionamento, que utilizam a tecnologia fotovoltaica. Na Figura 1.2 tem-se um telefone de uso público sobre uma jangada em Maceió (AL) e na Figura 1.3 um telefone celular com tecnologia GSM em uma canoa em no Lago Vitória (Uganda) para atender as comunidades de difícil acesso ao serviço de telecomunicações, só possível por meio de embarcações.

Figura 1.2 – Jangada com orelhão celular em Maceió (AL).



Figura 1.3 – Usuário usando tecnologia GSM e energia solar no Lago Vitória, em Uganda.



A Figura 1.4 mostra um telefone público da concessionária de telefonia em atendimento a uma comunidade isolada da rede pública de telecomunicações na região do semiárido piauiense.

Figura 1.4 – Usuário em orelhão da Oi beneficiado pela captação de energia solar, região do semiárido (PI).



A Figura 1.5 mostra um sistema de telefonia via satélite instalado na comunidade Melancias, zona rural do município de São Francisco do Piauí, que integra a comunidade ao resto do mundo. O sistema fotovoltaico além de atender aos moradores com o telefone fornece energia à bomba do poço, alimenta a rede elétrica da escola da comunidade e a TV via satélite através de uma antena parabólica, que traz entretenimento e diversão aos moradores da localidade.

Figura 1.5 – Orelhão via satélite da Embratel usando energia fotovoltaica na localidade Melancias, em São Francisco do Piauí (PI).



A Figura 1.6 mostra o sistema composto por telefone público (a cartão indutivo), placa de energia solar e transceptor celular fixo em Maceió (AL). O TCP-F (Telefone Celular Público Fotovoltaico) resolve a questão da telefonia pública em locais distantes, que pode ser instalado em 24 horas em locais em que haja sinal de telefonia celular. É resistente às intempéries e pode ser usado como orelhão, equipamento de comunicação de segurança e meio de comunicação de emergência em rodovias, entre outros.

Figura 1.6 – Sistema de telefonia pública utilizando energia fotovoltaica em Maceió (AL).



O sistema de telecomunicações para atendimento a comunidade isolada da rede pública de energia e de telecomunicações na localidade Tucuns dos Donatos, em Pedro II (PI), é composto por dois módulos fotovoltaicos, um controlador eletrônico de cargas, uma bateria automotiva, um equipamento de rádio transceptor monocal (12 Vcc), uma antena Yagi na faixa de VHF e o equipamento telefônico (orelhão). O sistema de telefonia rural opera na faixa de frequência de 250 MHz, foi instalado em julho/1998, e se encontra em pleno funcionamento. Nesse caso, o módulo está fixado sobre uma estrutura metálica a uma altura aproximada de 3 metros. Todavia, outras configurações também são possíveis: sobre o

telhado da pequena edificação que abriga o rádio transmissor ou afixado no próprio poste que suporta a antena instalada na altura de cerca de 10 m.

Na Figura 1.7 aparece o painel montado, que se encontra próximo ao poste de 12 m e o detalhe da antena do sistema de transmissão/recepção instalados por técnicos da concessionária dos serviços públicos de telecomunicações, ex-Telepisa, hoje Telemar (Oi).

Figura 1.7 – Painel solar e antena sendo instalados na comunidade rural Tucuns dos Donatos em Pedro/PI.



[Fotos: José M. Dantas, Telepisa, 1998].

Em pesquisa realizada em 2008, existia cerca de 30 municípios piauienses que possuíam sistemas semelhantes a esses, instalados pela empresa concessionária de telecomunicações. Em [4] é apresentada a relação dos sistemas fotovoltaicos de telecomunicações da empresa Oi, destinados ao fornecimento elétrico a Telefones de Uso Público - TUPs na zona rural de diversas comunidades piauienses.

Observou-se que, praticamente, todos os territórios piauienses apresentaram comunidades beneficiadas com serviço de telefonia graças a essa tecnologia de geração distribuída. Em algumas comunidades, após a eletrificação, a remoção do sistema fotovoltaico não é de imediato. Visto que, o sistema continua sendo mantido por meses até necessitar de reparos, quando então é removido. A confiabilidade desses sistemas de geração frente à baixa qualidade do fornecimento elétrico, principalmente no meio rural, está entre os principais motivos que justificam essa prática.

De acordo com o artigo 15 do Decreto Nº 7.512 de 30 de junho de 2011, que aprovou o Plano Geral de Metas para a Universalização do Serviço Telefônico Fixo Comutado Prestado no Regime Público - PGMU, em que todas as localidades com mais de cem habitantes devem dispor de pelo menos um TUP instalado em local acessível vinte e quatro horas por dia para que qualquer pessoa ou instituição possa fazer uso dos serviços de telecomunicações, independente de sua localização e condições socioeconômicas.

Outra aplicação da energia solar fotovoltaica no setor de telecomunicações piauiense é encontrada em estações remotas via satélite, que utilizam RLU (*Remote Line Unit*). Tais estações são destinadas ao atendimento telefônico de pequenas localidades, podendo conter até 32 canais para assinantes. Nesse caso, quando as comunidades a serem atendidas não possuem rede elétrica para o fornecimento de energia, a opção fotovoltaica apresenta-se como boa alternativa. Além disso, a geração fotovoltaica é também utilizada para atender demandas emergenciais de telecomunicações quando o fornecimento de energia elétrica é interrompido por períodos longos de tempo. Atualmente, as aplicações desta opção tecnológica em centrais maiores ou em repetidoras não são usuais nas empresas concessionárias de telecomunicações, posto que necessitam de maiores demandas elétricas para os equipamentos e para a climatização do ambiente em que operam. Esses fatores implicam em elevados custos, inviabilizando esses empreendimentos. Todavia, tendo em vista o atual cenário brasileiro e o plano de universalização dos serviços de telecomunicações, a tecnologia solar fotovoltaica apresenta-se bastante promissora.

As comunidades não atendidas por energia da rede pública, que já possuem sistemas de telecomunicações operando com baterias, podem substituir seus sistemas de armazenamento de energia por ultracapacitores, desde que as alterações dos projetos técnicos sejam realizadas por profissionais especializados. Os ultracapacitores têm como objetivo armazenar a energia vinda do painel solar via conversor elevador *boost*. Um conversor abaixador de tensão *buck* interliga os ultracapacitores com o transceptor. O objetivo deste trabalho é mostrar que é possível substituir o sistema de baterias por ultracapacitores como forma de armazenamento de energia.

1.3 O porquê de atender as comunidades isoladas sem redes de energia e de telecomunicações

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As

facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica [6].

A energia solar se mostra uma grande alternativa para geração de energia elétrica, pois nos dias atuais, em que os problemas ambientais se agravam e as matérias-primas se esgotam, torna-se arriscada a exploração continuada dos combustíveis fósseis e nucleares para sustentar a crescente demanda a que nossa sociedade está habituada.

Para atender as comunidades isoladas se faz necessário o uso de energias alternativas, como eólica, solar, diesel, cavaco para uso em termoelétrica, mas com a queima de madeira e a degradação do meio ambiente, é a forma de utilização menos recomendável. Como na maioria das comunidades isoladas da rede de energia elétrica no interior do Brasil, e especialmente, no Norte e Nordeste, não possui ventos suficientes para se gerar energia com aerogeradores, e como se tem a energia do sol abundantemente durante, praticamente, todos os dias do ano, e por ser mais barata para se produzir, optou-se no sistema proposto neste trabalho em utilizar a energia solar como forma de baratear os custos de montagem.

Para atendimento a essas comunidades isoladas, a presidenta da república, sancionou o Decreto Nº 7.512, de 30 de junho de 2011, que trata sobre o Plano Geral de Metas para a Universalização do Serviço Telefônico Fixo Comutado Prestado no Regime Público – PGMU, especificamente, os art. 4º, 9º, 16, 19 e 20 tratam sobre o assunto.

1.4 Custo para se levar energia até as comunidades isoladas

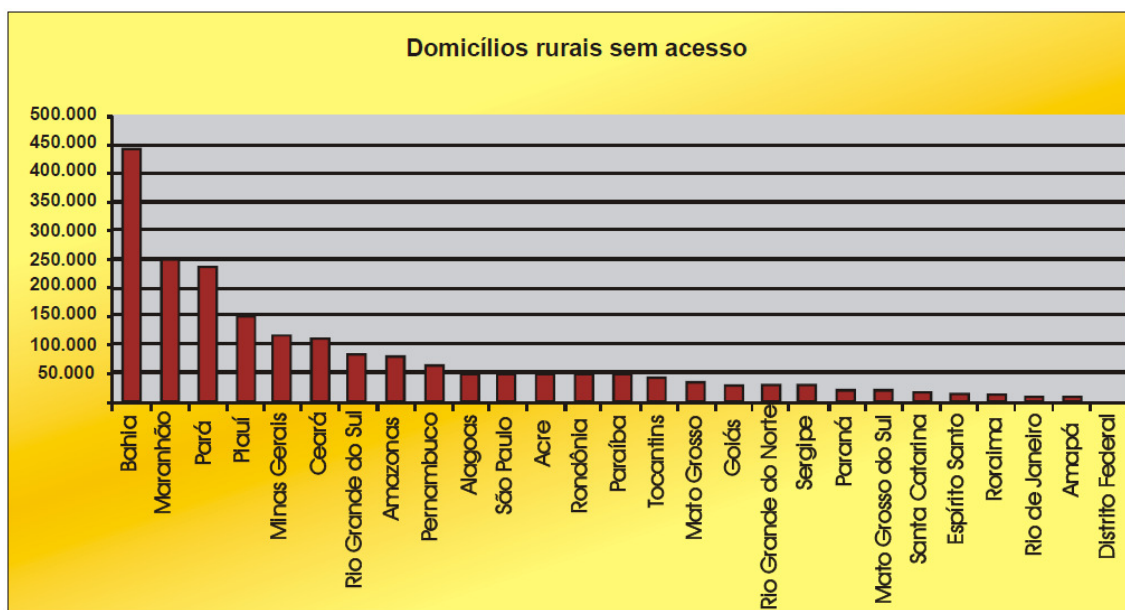
A energia é fator essencial ao desenvolvimento social e econômico de uma região ou país. A qualidade de vida de que dela resulta possibilita realizar as tarefas mais simples e essenciais ao cotidiano de qualquer pessoa. Porém, há muitas comunidades que não usufruem dos benefícios do acesso à energia no Brasil, em especial na Amazônia e em partes do Nordeste. Abrangendo quase 60% do território nacional, a Amazônia abriga inúmeras comunidades ribeirinhas que não dispõem de recursos básicos à sobrevivência, dentre eles a energia elétrica. São populações muito pequenas que se distribuem por áreas dispersas, mas que totalizam milhares de habitantes com acesso precário à energia. As dificuldades em levar a eletrificação rural a essas comunidades, e a necessidade de limitar o uso de combustíveis fósseis, substituindo-os por alternativas energéticas não poluidoras e renováveis, tornam urgente o investimento em pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Projetos para a obtenção de energia elétrica gerada a partir de unidades de produção baseadas

em biomassa, eólica, solar e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) começam a ser implantados em comunidades isoladas da Região Norte [7, 8]. Porém, assim como as demais fontes alternativas, o custo de instalação dessas tecnologias é alto, dificultando o seu acesso pelas pequenas comunidades isoladas tanto da Amazônia quanto do Nordeste.

Para se reverter essa situação, uma das formas é promover os sistemas alternativos de energia associados a programas sociais de geração de renda. Em especial no caso da energia fotovoltaica, é certo que uma concessionária de energia não terá interesse em instalar de graça painéis para a captação de luz solar. É necessário que haja incentivos governamentais à geração de renda para essas comunidades isoladas.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), o atendimento de energia elétrica às populações rurais brasileiras ainda não atendidas representa um enorme desafio para o país, pois se refere a um contingente de cerca de 10 milhões de brasileiros que vivem no campo, distribuídos em 2 milhões de domicílios – representando 80% do total nacional da exclusão elétrica. A Figura 1.8 mostra os números absolutos de exclusão elétrica rural por Estado da Federação.

Figura 1.8 – Números absolutos de exclusão elétrica rural por Estado da Federação.



Fonte: Ministério das Minas e Energia - MME

As principais fontes primárias de energia disponíveis na Amazônia, com maiores chances de aproveitamento, são a fotovoltaica, a hidrocínética e a biomassa (lenha, resíduos florestais e óleos vegetais) em toda a região, e a eólica (em partes dos litorais do Pará e

Amapá), cujos custos aproximados de instalação e geração estão representados na Tabela 1 [8].

Tabela 1 – Custos de Instalação e de Geração de Energia de Fontes Renováveis.

		Custo de Geração – (US\$/MWh)	
		Sem CCC	Com CCC
Fotovoltaica	10.000,00	313,32	78,33
Hidrocinética*	5.000,00	180,10	98,23
Eólica	1.000,00	45,01	26,05
Gaseificação**	750,00	115,28	101,00
Vapor	600,00	113,67	96,91
Biodiesel***	303,00	305,00	300,18

*Roda d'água flutuante **Sem consumo de diesel ***Biodiesel de babaçu

FONTE: http://www.portal.fucapi.br/tec/imagens/revistas/ed06_completo.pdf, p. 30-35

Nessa tabela, além dos custos normais de geração, apresentam-se os custos de geração levando em consideração a sub-rogação da Conta de Consumo de Combustível (CCC) destinada a subsidiar a instalação de fontes renováveis. O emprego maciço dessas fontes faz parte das prioridades do programa Luz para Todos, do governo federal, que objetiva o acesso e uso da energia elétrica por todos os brasileiros.

No entanto, conforme se pode perceber, o uso de fontes renováveis, em escala significativa, nas condições amazônicas, passará, obrigatoriamente, pela minimização das fontes, com vistas ao atendimento de pequenas demandas de energia; consolidação técnica de determinadas tecnologias (especialmente de biomassa); e diminuição dos custos de investimento, que só deverá ocorrer quando se aumentar a escala de produção das fontes.

A superação dessas barreiras só poderá ser esperada, logicamente, no longo prazo, e dependerá de vontade política por parte dos tomadores de decisão. Caso contrário, perpetua-se o ciclo vicioso que se depara atualmente. Desse modo, é necessário que se garanta demanda para que os fabricantes possam ter a garantia de retorno de investimento em pequenas fontes renováveis, o que dependerá, certamente, de decisões políticas sustentáveis em longo prazo.

Visto apenas pela ótica financeira, na qual as externalidades positivas não são valoradas e incorporadas aos custos, não há dúvida que o abastecimento de energia às comunidades isoladas, longe de ser um investimento com retorno econômico, significa um aumento nos encargos das empresas concessionárias, motivo pelo qual elas não têm demonstrado interesse em atender essa classe de consumidores. No entanto, o acesso dos excluídos à energia elétrica - cerca de 15 milhões de brasileiros - não pode ser visto, apenas, pela ótica do investimento financeiro. Deve ser encarado, todavia, como um investimento

social, capaz de influenciar forte e positivamente na melhoria das condições de vida dessas pessoas.

Segundo o estado da arte das fontes alternativas de energia, tanto no que diz respeito à maturidade tecnológica (tecnologia dominada, disponibilidade de peças de reposição, rede de assistência técnica, etc) quanto com relação à escala de produção de energia (compatível com a maioria das comunidades da região), somente a fotovoltaica e a hidrocínética poderão ser consideradas, atualmente, como disponíveis ao atendimento energético de comunidades isoladas da região amazônica como também nas regiões Centro-Oeste e Nordeste.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através da Resolução N° 493/2012 de 05/06/2012, estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI [9]. Além dos sistemas padronizados, desde 2004, já foram instalados inúmeros sistemas residenciais e comunitários de menor ou maior porte durante os anos 1990 até hoje, procedente de cooperações técnicas com outros países ou programas do governo federal (PRODEEM) [10].

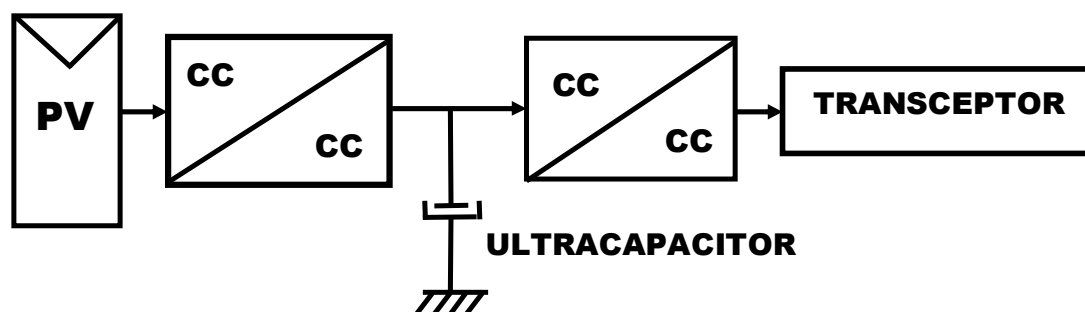
Nesse tópico mostra-se que existem muitas comunidades isoladas sem energia no país. Mesmo assim, o sistema proposto, depende da geografia do terreno para os casos em que o atendimento se dá em até 30 km da sede do município. O serviço deve ser disponibilizado para ser atendido via rádio, que é o propósito desse projeto, isso para a operadora regional, que deve disponibilizar o serviço, em atendimento ao parágrafo primeiro do art. 16 do do Decreto N° 7.512, de 30 de junho de 2011. Em caso de localidades acima de 30 km, a operadora de Longa Distância Nacional é a responsável pelo fornecimento do serviço de telecomunicações, conforme parágrafo segundo do mesmo decreto.

O projeto ora apresentado não necessita atender às exigências da ANEEL em seu Art. 5° da referida resolução, visto que a carga do sistema de telecomunicações tem baixa potência de consumo, estando, portanto, fora das especificações técnicas exigidas.

1.5 Sistema Proposto

O diagrama de blocos do sistema desenvolvido é mostrado na Figura 1.9. Este pode ser subdividido em cinco subsistemas; o sistema fotovoltaico PV, o conversor CC/CC elevador, os ultracapacitores, o conversor CC/CC abaixador e o transceptor. Todos estes subsistemas são gerenciados por um microcontrolador que determina o tempo de funcionamento de cada subsistema, bem como monitora a condição de carga dos ultracapacitores.

Figura 1.9 – Diagrama de blocos do sistema proposto.



O protótipo foi desenvolvido para suprir uma comunidade isolada da rede de energia elétrica para atendimento ao serviço de telefonia em uma localidade desprovida dos serviços de telecomunicações.

O sistema proposto pode ser instalado para atendimento a comunidades isoladas da rede de energia elétrica como propriedades rurais, sítios, chácaras, fazendas, repetidoras de sinais de telecomunicações, canteiros de obras de construtoras, em que seja difícil a instalação de postes da rede pública de energia, bem como ser usado como telefone de uso público e acesso à Internet. Pode ainda, de acordo com o perfil topográfico do terreno, atender localidades distantes do lado da central telefônica em até 100 km do município sede.

1.6 Conclusão

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para suprir energia a um sistema de telefonia para atendimento de uma comunidade isolada. O módulo de armazenamento de energia é constituído de ultracapacitores os quais substituem as baterias automotivas.

Como vantagens sobre módulos de baterias estão o menor peso, menor volume e vida útil superior com menos manutenção. O tempo de vida útil dos ultracapacitores situa-se em torno de 10 anos contra 3 anos de vida útil das baterias. O sistema fornece alimentação para o equipamento transceptor podendo ser utilizado dois ou mais canais, com potência de

consumo de 13 W. O sistema será projetado com capacidade para alimentar serviços de telecomunicações para atendimento a comunidades isoladas da rede pública de telefonia fora da área de atendimento básico das concessionárias dos serviços públicos por até 3 horas noturnas, podendo ser ativado como um Telefone de Uso Público – TUP (conhecido popularmente como orelhão), serviço de conexão à internet, atendimento a postos de saúde, escolas rurais, pequenas residências, fazendas, sítios e chácaras com potência máxima instalada de até 50 W.

Este trabalho está dividido como segue:

O segundo capítulo inicia-se com o estudo genérico sobre o painel fotovoltaico a ser utilizado, bem como descreve sobre os ultracapacitores, seu dimensionamento, sua forma de armazenamento de energia e o comparativo de custos e vantagens sobre as tradicionais baterias usadas em sistemas fotovoltaicos e as principais configurações instaladas no Brasil. Neste capítulo também será apresentado o dimensionamento dos conversores que serão utilizados no sistema proposto de acordo com as normas regulamentadoras e autorizativas da ANEEL [9], assim como, o funcionamento do transceptor monocal que funcionará como carga do sistema.

O terceiro capítulo apresenta o estudo teórico do conversor *boost* responsável pelo carregamento dos ultracapacitores. Será apresentado seu princípio de funcionamento, equacionamento, projeto, simulação e controle, o qual deve garantir que o painel fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, garantido assim que seja extraída a sua máxima potência para qualquer nível de radiação solar. Também será dimensionado o conversor *buck* responsável pela retirada da energia dos ultracapacitores para fornecimento ao transceptor, tanto para funcionamento durante o dia com a presença de luz solar quanto na sua ausência, no período noturno, e quando em dias nublados com pouca incidência de raios solares. Por fim, serão apresentados o circuito de controle e o algoritmo usado pelo sistema.

O quarto capítulo apresenta o resultado das simulações e os testes feitos em laboratório como foco principal para este trabalho que é um conversor capaz de alimentar um rádio transceptor monocal com baixa potência operando em corrente contínua.

Ao final do capítulo são apresentados os resultados experimentais para o protótipo implementado, verificando e comprovando os estudos teóricos realizados nos capítulos anteriores.

Ao fim do trabalho descreve-se a conclusão geral acerca de todo o estudo, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 COMPONENTES DO SISTEMA: PAINEL FOTOVOLTAICO, CONVERSORES, ULTRACAPACITORES E TRANSCEPTOR.

2.1 Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é a unidade básica para a conversão da energia radiante do Sol em eletricidade e é confeccionada com materiais semicondutores como o Silício (Si), o Germânio e Arseneto de Gálio. O silício é o mais utilizado devido ao processo de fabricação das suas lâminas ser bastante desenvolvido e pelo domínio da tecnologia por parte da indústria de eletrônica que produz em larga escala.

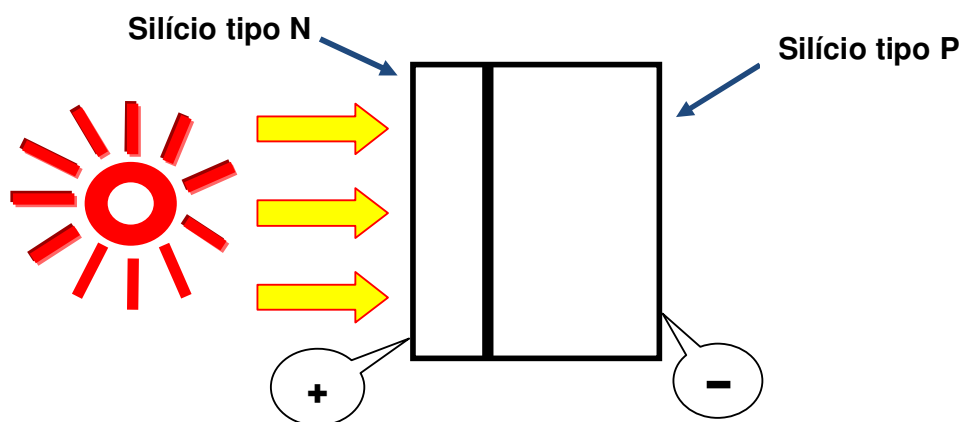
Na análise semântica da palavra fotovoltaico, perceber-se que este termo surge da junção de “foto”, que significa luz, com “voltaico”, que se refere ao aparecimento de uma diferença de potencial através de uma reação química. Esta divisão permite ter uma noção, ainda que intuitiva, do significado do fenômeno efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é o fenômeno responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica. Este se realiza em materiais semicondutores, que tal como o próprio nome indica, possuem características intermediárias entre um condutor e um isolante. Os semicondutores caracterizam-se pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (zona de valência) e de outra zona chamada banda de condução [11].

O silício normalmente apresenta-se como areia, obtendo-se na sua forma pura através de métodos adequados. Os elementos do grupo IV da tabela periódica, como o silício, caracterizam-se por possuírem quatro elétrons de valência que se ligam aos átomos vizinhos através de ligações covalentes, formando uma rede cristalina. O cristal de silício puro não apresenta elétrons livres e, portanto é um mau condutor elétrico. Para inverter esta situação é necessário adicionar outros elementos químicos ao sistema. Quando átomos que possuem cinco elétrons de valência, como o Fósforo ou o Arsênio, são adicionados ao sistema, há um elétron em excesso que fica livre para estabelecer ligações covalentes, enfraquecendo a sua ligação com o átomo de origem. Por outro lado, quando átomos que possuem três elétrons de valência, como o Boro ou o Índio, são adicionados ao sistema, há falta de um elétron para estabelecer as ligações covalentes com os átomos de silício, formando uma lacuna. Desta forma, é necessária uma pequena quantidade de energia para que, no primeiro caso, o elétron livre seja libertado para a banda de condução, e no segundo caso, um elétron de um local vizinho se desloque e preencha a lacuna. Assim, o Fósforo ou o Arsênio são doadores de

elétrons do tipo N (Silício tipo N) e o Boro ou o Índio, são aceitadores de elétrons do tipo P (Silício do tipo P) [11].

Cada célula solar é constituída por uma camada fina de material do tipo N e outra com maior espessura de material do tipo P, como se pode observar Figura 2.1.

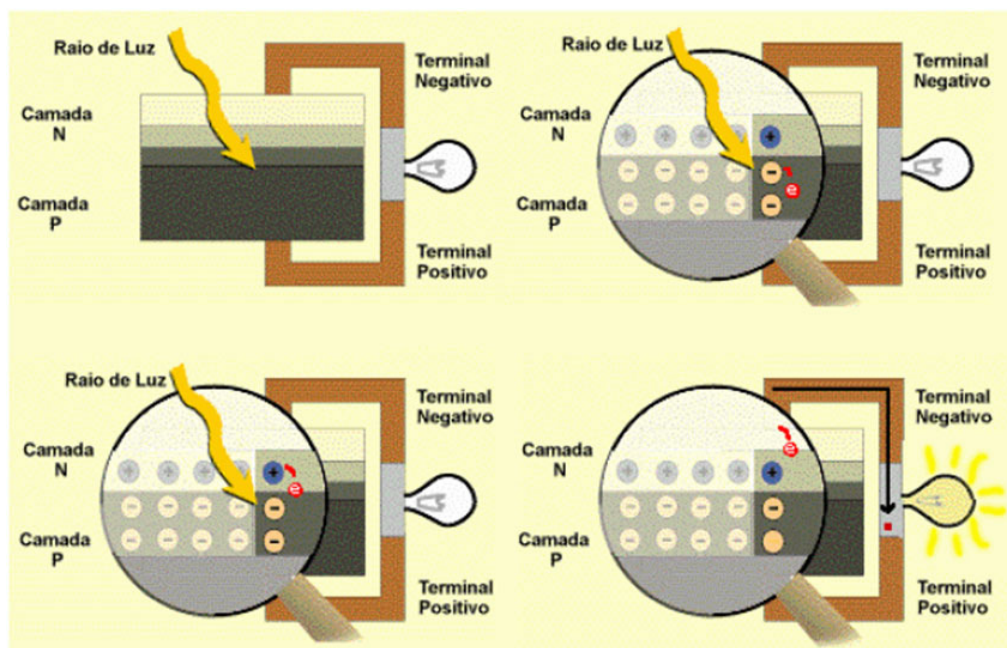
Figura 2.1 – Camada do tipo P e camada do tipo N da célula solar.



Separadamente, as camadas do tipo N e do tipo P são eletricamente neutras, no entanto, ao serem ligadas, através da junção P-N gera-se um campo elétrico. Na zona da junção dá-se uma transferência de elétrons livres, do lado N para o lado P, que irão preencher as lacunas. Este deslocamento de elétrons provoca um déficit de elétrons do lado N, tornando positivamente e uma concentração de elétrons do lado P, ficando carregado negativamente. Surge assim um campo elétrico na zona da junção. Este processo atinge um ponto de equilíbrio quando o campo elétrico é capaz de impedir a passagem dos elétrons livres do lado N para o lado P. A tensão total da junção é cerca de 1 V e é chamada tensão de difusão [11].

A luz solar ao incidir sobre a junção P faz com que os fótons choquem com os elétrons da camada de silício, fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Os elétrons da zona de valência se deslocam para a banda de condução, ou seja, os fótons arrancam os elétrons das ligações covalentes formando pares elétrons-lacunas, que são acelerados por efeito do campo elétrico em sentidos opostos. Como resultado do deslocamento das cargas obtém-se uma diferença de potencial entre as superfícies opostas da célula – efeito fotovoltaico. Esta tensão é chamada de tensão de circuito aberto. Na Figura 2.2 pode-se observar o efeito fotovoltaico numa célula [6].

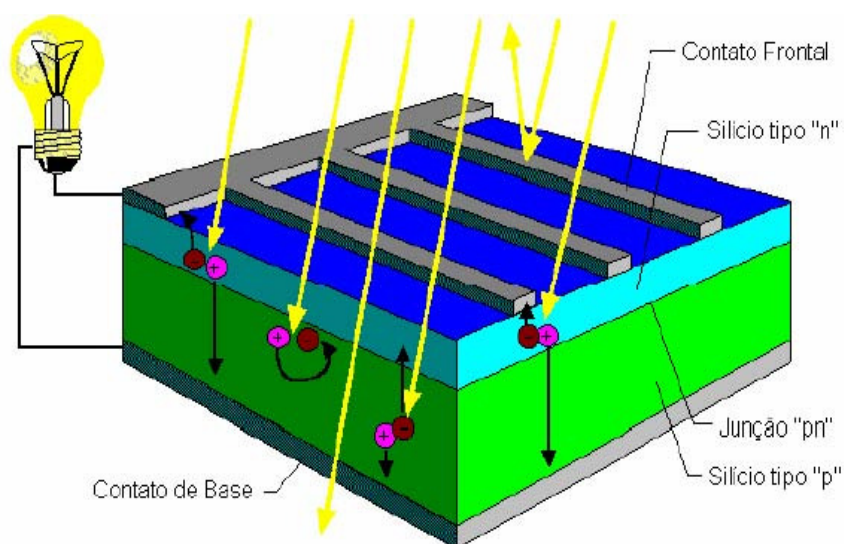
Figura 2.2 – Efeito fotovoltaico na junção P-N [6].



Através de um condutor externo liga-se a camada negativa (Silício tipo P) à camada positiva (Silício tipo N). Desta forma, cria-se um caminho para a corrente elétrica na ligação, enquanto a luz solar incidir na célula, sendo que a intensidade dessa corrente é proporcional à intensidade de luz incidente - corrente de curto-circuito.

A Figura 2.3 mostra a estrutura da célula fotovoltaica [6].

Figura 2.3 – Esquemático de uma célula fotovoltaica de silício [6].



Durante o efeito fotovoltaico são envolvidos três efeitos físicos que se relacionam entre si, sendo eles a absorção, transferência de energia e energia elétrica [6].

A luz é composta por fótons que podem penetrar em determinados materiais e até atravessá-los. Um raio luminoso ao incidir sobre um material pode ser refletido, absorvido ou refratado. Quando um raio solar incide sobre uma célula fotovoltaica, este é absorvido e restituído sob a forma de outra energia – absorção [12].

Todos os materiais são formados por átomos que possuem um núcleo e um conjunto de elétrons que gravitam em redor do núcleo. Os elétrons ao absorverem a energia dos fótons libertam-se da influência do núcleo, ficando livres – transferência de energia dos fótons para as cargas elétricas. Estes elétrons livres constituem a corrente elétrica [12].

Para que os elétrons livres possam ser uma fonte de energia elétrica, estes têm de circular no exterior do semicondutor. Isto é conseguido com uma junção P-N, cujo objetivo é criar um campo elétrico no interior do material de forma a separar as cargas negativas das cargas positivas – criação de corrente elétrica [12].

As células solares fotovoltaicas podem ser encontradas no mercado e estão divididas em três categorias. As células de primeira geração são feitas a partir de silício cristalino, que englobam as células monocristalinas e policristalinas. As de película fina pertencem ao grupo de células de segunda geração, são de novos materiais semicondutores explorados. As de terceira categoria englobam vários conceitos novos de células solares, estão ainda, sem sua maioria, na fase de desenvolvimento, como as de soluções microcristalinas, nanocristalinas ou híbridas [12]

As células solares de silício cristalino tem dominado a indústria fotovoltaica desde seu início, sendo uma tecnologia bastante conhecida e confiável. É tanto que se apresentam como líderes mundiais de mercado [12].

As células solares de silício monocristalino, ilustradas na Figura 2.4 a) representam a primeira geração de células solares, sendo estas, as mais usadas e comercializadas para painéis fotovoltaicos. Estas células são cortadas a partir de um único cristal de silício de grandes dimensões e de elevada pureza. Apresentam rendimento de cerca de 24% em laboratório, o que na prática se traduz numa eficiência entre 15% e 20% [13]. As técnicas utilizadas para a sua produção são caras e complexas, o que se reflete no preço final para o consumidor. Este custo elevado deve-se ao fato do processo de fabricação exigir uma grande quantidade de energia bem como materiais no seu estado puro e com uma estrutura cristalina perfeita.

As células solares de silício policristalino, mostradas na Figura 2.4 b) são constituídas por um grande número de pequenos cristais de silício e também pertencem ao grupo de células de primeira geração. O seu processo de fabricação é mais simples e necessita

de menos energia, se comparado com as células monocristalinas, o que reduz o seu custo de produção. Contudo, estas apresentam um rendimento inferior, entre 12% e 15% [13], devido ao fato do silício conter imperfeições resultantes do seu processo de fabricação.

São as células que apresentam uma melhor relação preço/rendimento sendo por isso bastante utilizadas [11].

As células solares de película fina ou filme fino, representadas na Figura 2.4 c) constituem o grupo de células de segunda geração. Esta geração surgiu como resposta à necessidade de encontrar uma alternativa às células de primeira geração, muito dispendiosas no seu processo de produção, por requererem elevadas temperaturas na sua produção e elevados graus de pureza.

Este tipo de células é constituído por películas finas de silício, permitindo assim reduzir a espessura da célula e quantidade de silício usada. O seu processo de fabricação apresenta um baixo consumo de energia.

As grandes desvantagens são o rendimento, tipicamente entre 5% e 10% de degradação nos primeiros meses de vida, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

A principal tecnologia é o silício amorfo (a-Si), muito usada na eletrônica profissional, em relógios e calculadoras. As células de silício amorfo são películas muito finas o que permite que sejam utilizadas como material de construção, tal como em fachadas ou telhados de edifícios. Isto possibilita o seu uso em grande escala, atenuando o problema do baixo rendimento energético [12].



Além das células fotovoltaicas baseadas em silício, existem outras com materiais que estão sendo pesquisadas e testadas em laboratórios. Os pesquisadores prometem custos mais reduzidos, mas não devem aparecer no mercado nos próximos anos, uma vez que, ainda se encontram em fase de estudo. Dentre essas novas tecnologias destacam-se as tecnologias

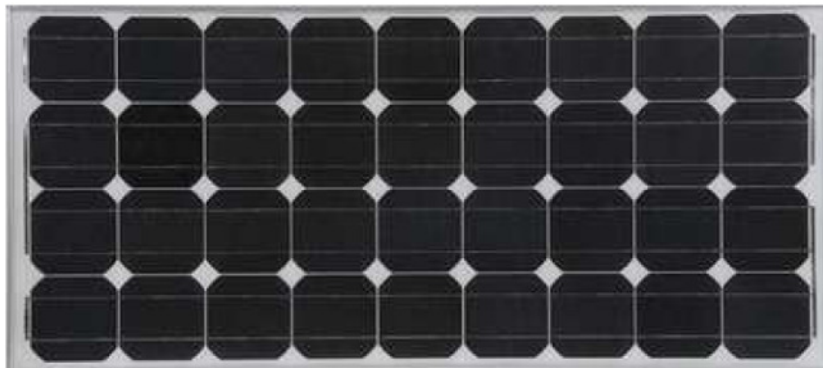
nanocristalinas sensibilizadas com corantes, microcristalinas, micromorfas e híbridas. As células *Copper Indium Deselenid (CIS)* e *Cadmium Telluride (CdTe)*, *Dye-sensitized* são outros exemplos de tipos de células [15].

2.2 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é o elemento responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica. A Figura 2.5 mostra o painel solar da fabricante SIEMENS modelo S55 com 36 células de silício monocristalino, matriz 4x9, utilizado no experimento e que se encontra instalado sobre o telhado do Laboratório do Grupo de Processamento de Energia e Controle - GPEC da Universidade Federal do Ceará. Suas características elétricas encontram-se detalhadas no capítulo seguinte.

O painel fotovoltaico gera energia a partir de pequenas células de silício tendo como fonte geradora o sol. A energia é captada sobre sua superfície quando ocorre à incidência de raios solares em diferentes ângulos, a intensidade do feixe é maior quando a incidência ocorre em 90°.

Figura 2.5 – Painel fotovoltaico utilizado no experimento.



O painel fotovoltaico não pode armazenar energia elétrica, desta forma, toda a energia gerada deverá ser armazenada em um banco de ultracapacitores. Para maximizar a potência de saída do painel fotovoltaico, devem ser utilizados algoritmos de procura do Ponto de Máxima Potência do painel (MPPT- *Maximum Power Point Tracking*). Utilizou-se nesse projeto a técnica Perturba e Observa (P&O) para o controle do conversor *boost* e a técnica de controle por Histerese para o controle do conversor *buck*.

A energia fotovoltaica é sustentável porque é uma tecnologia de energia renovável que converte a radiação solar diretamente em eletricidade. A energia solar está abundantemente disponível, a terra recebe energia solar suficiente a cada hora para atender às necessidades mundiais de energia anual.

As vantagens do Pannel fotoVoltaico (PV) comparados com outras formas de geração de energia elétrica são múltiplas. Pode-se citar como vantagens: a) recurso ilimitado de energia solar, b) disponível em todas as partes do mundo, c) modular, que varia de miliwatts nos consumidores de produtos para gigawatt em futuras centrais elétricas; d) durante a operação, produz eletricidade sem a emissão de poluentes e sem produção de resíduos atmosféricos, e) silencioso durante a operação, f) vida útil comprovada tecnicamente em mais de 30 anos, g) baixo custo de manutenção, h) sem custos com combustíveis, i) descentralização da rede elétrica [9].

No entanto, possui desvantagem de a) alto custo inicial, b) potência instantânea do sistema pode sofrer oscilação devida as variações da radiação solar disponível, c) necessita de armazenadores de energia, d) conscientização e treinamento do usuário [30].

Sistemas de energia solar fotovoltaicos, uma vez instalados, não requerem muito esforço de manutenção ou durante sua operação. Porém, os consumidores sentem dificuldades em se adaptar a limitação do sistema em termos de fornecimento restrito de energia elétrica. Mesmo com muitas instruções e manuais descritivos, as famílias precisam de certo período de tempo para se adequar ao sistema solar.

Em conjunto com outros custos e despesas tais como pessoal, encargos, veículos, cobrança etc., levando em conta também a estrutura territorial da abrangência de atendimento da concessionária e as distâncias reais dos consumidores a rede elétrica existente, pode ser calculado a competitividade dos sistemas fotovoltaicos em comparação com a conexão a rede comum.

Esta comparação não é simples e não pode ser resumido em alguma fórmula “mágica”. Profundas análises econômicas da estrutura da concessionária e social do usuário são determinantes para os sistemas fotovoltaicos serem aceitos por ambas as estruturas. Um das poucas concessionárias que adotaram a energia solar como fonte alternativa de energia, não somente como medida, mas em situações sem recursos, foi a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Coelba, que demonstrou claramente ser uma solução até economicamente viável em comparação com a rede comum.

No interior da Bahia, por exemplo, para um número de 9000 ligações na área rural, foi feito um estudo exaustivo de comparação de sistemas SIGFI com o da rede comum. Para um período de 25 anos, o custo dos sistemas individuais de energia solar é aproximadamente 4 vezes menor do que o da rede comum, considerando todos os parâmetros econômicos de depreciação, manutenção e operação de ambos os sistemas. Em muitas situações, não existe outra solução a não ser a energia solar, tais como em localidades de

extrema dificuldade de acesso (montanhas), consumidores distribuídos numa área de grande extensão, ou ilhas com relativamente poucas casas [14].

Diversas aplicações vêm sendo desenvolvidas de forma acelerada nos últimos anos, para o uso de energia solar. Tudo que é acionado por eletricidade é passível de utilizar energia solar. Se analisada em longo prazo, qualquer aplicação é vantajosa, no entanto, há aquelas com maior retorno do investimento em certas condições. Por exemplo, tem-se energização em locais afastados de linhas eletrificadas; energização de equipamentos eletrônicos; telecomunicações, principalmente em locais remotos e, nesse trabalho, telefonia rural para atendimento a comunidades isoladas da rede pública de telecomunicações e de energia.

2.3 Ultracapacitores

As diversas tecnologias estão disponíveis ao ser humano para que ele exerça suas atividades diárias de locomoção, comunicação, estudos, pesquisas, dentre tantas outras ofertas que a seus olhos não têm fim devido à disponibilidade de tecnologia oferecida ao seu bem estar diário. Aos usuários dos diversos sistemas envolvidos pela economia mundial, inicia-se este tópico com o estudo dos ultracapacitores.

Atualmente, para funcionar, quase tudo requer uma bateria como computadores, telefones celulares móveis, lanternas, carros elétricos híbridos, dispositivos de entretenimento pessoal portátil, como *tablet*, *Smartphones*, etc. Como a funcionalidade aumenta na era digital, por isso se tem a confiança na bateria tradicional. A bateria não avançou muito além do projeto básico desenvolvido por Alessandro Volta, no século 19.

A nanotecnologia é uma das promessas para melhorar a qualidade de vida do ser humano no século 21. A expectativa é que ela possa gerar produtos e processos mais eficientes e econômicos, com menor gasto de energia e menos agressivos ao meio ambiente. Mas, para que o "nano" chegue às prateleiras, é necessário ultrapassar a barreira da pesquisa e, só então, entrar na fase de fabricação e possível comercialização.

Em trabalho realizado por pesquisadores do Laboratório do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), Estados Unidos, para Sistemas Electromagnéticos e Eletrônica, nos últimos anos, foi oferecida uma alternativa economicamente mais viável para as baterias convencionais em mais de 200 anos em um circuito elétrico. O ultracapacitor pode funcionar tanto como uma bateria como um capacitor. Ultracapacitores poderiam permitir a *laptops* e telefones celulares a serem utilizados com maior rapidez em seus acionamentos. Ao contrário

de baterias de *laptop*, que começam a perder sua capacidade de manter a carga depois de um ano ou dois (várias centenas de ciclos de carga/descarga), ultracapacitores têm centenas de milhares ciclos de carga/descarga e ainda pode continuar muito forte mesmo depois que os dispositivos em que são usados estiverem obsoletos [31].

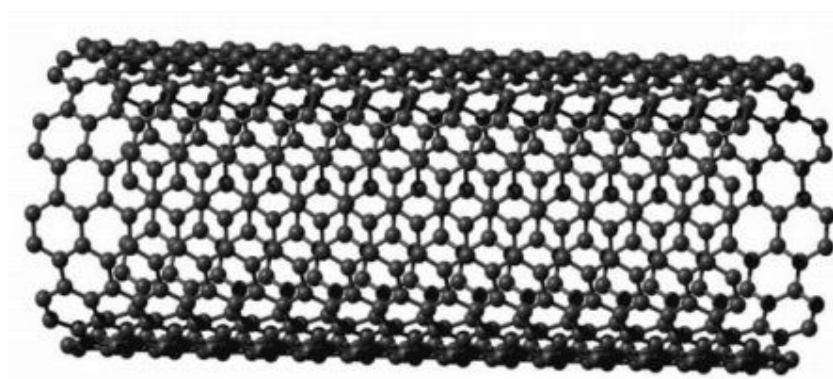
Dois grupos de pesquisadores trabalhando isoladamente anunciaram quase ao mesmo tempo a descoberta do que poderá se tornar o mais importante avanço em sistemas de armazenamento de energia desde sua invenção. Além dos aparelhos portáteis, uma infinidade de aplicações utiliza as baterias como fonte de energia, de sistemas de *no-breaks* até veículos híbridos. Mas sua tecnologia não sofreu nenhum avanço radical nos últimos anos [32].

Cientistas dos Laboratórios *Bell* e da empresa *mPhase* relataram a construção de um protótipo de bateria "inteligente", a partir de materiais nanoscópicos, capaz de fornecer energia, não de forma contínua, como as pilhas e baterias tradicionais, mas apenas quando essa energia for necessária. O protótipo ainda é pequeno, produzindo energia suficiente para alimentar um *LED* (*Light Emitter Diode*). Mas os cientistas estão entusiasmados com seu potencial. A nova bateria é a demonstração prática de uma descoberta feita pelos mesmos pesquisadores, de que um eletrólito permanece sobre superfícies nanoestruturadas até ser estimulado a fluir. Esse "estímulo" é o gatilho para que a nova bateria comece a produzir eletricidade [32].

Esse comportamento "inteligente" poderá permitir a ativação das baterias quando necessário, aumentando enormemente sua vida útil.

Pesquisadores do MIT utilizaram membranas criadas com nanotubos de carbono para aprimorar um outro tipo de dispositivo de armazenagem de energia, chamado ultracapacitor, A Figura 2.6 mostra a representação dos nanotubos de carbono [32].

Figura 2.6 – Representação dos nanotubos de carbono.



Os nanotubos de carbono têm um desenho perfeitamente regular, além de possuir diâmetros de apenas alguns poucos átomos. A membrana construída com eles apresenta uma área superficial muito maior, o que se traduz em uma eficiência no armazenamento de energia.

A aplicação industrial dos nanotubos alcança as áreas de energia, eletrônica, medicina e indústrias química e petroquímica. Com estrutura cilíndrica formada por átomos de carbono, o diâmetro dessas moléculas corresponde a bilionésima parte do metro (um nanômetro). Essa característica lhe assegura propriedades diferenciadas de resistência mecânica e condutividade elétrica e térmica. A simples adição de 0,5% de nanotubos em determinados materiais pode aumentar sua resistência em até 20 vezes.

Os cientistas afirmam já deter a tecnologia para a fabricação das membranas de nanotubos de carbono em qualquer formato, o que poderá facilitar a fabricação de ultracapacitores nos formatos das pilhas e baterias tradicionalmente utilizados em aparelhos eletrônicos. Os avanços nesta área veem tornando promissor a substituição, no futuro próximo, as pilhas e baterias serão substituídas por componentes à base de ultracapacitores.

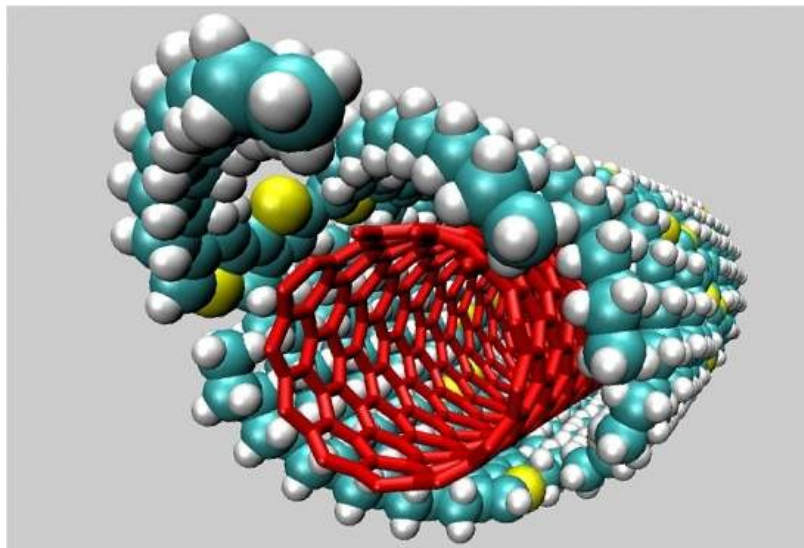
Os nanotubos de carbono são úteis para fabricação de telas dobráveis, aparelhos eletrônicos flexíveis e peles artificiais supersensíveis, até elevadores espaciais. A Figura 2.7 mostra o nanotubo semicondutor encapsulado pelo polímero.

Mas há um desafio a ser vencido. Quando os nanotubos de carbono são fabricados, tudo o que se vê é um pó preto que não é ideal para nenhuma dessas aplicações. O problema crucial é que, com as técnicas atuais, os nanotubos semicondutores e os nanotubos metálicos são produzidos aleatoriamente e ficam misturados - uns são ideais para algumas aplicações e inservíveis para outras, e vice-versa. Os nanotubos metálicos, por exemplo, são ideais para fios e eletrodos para baterias, enquanto os nanotubos semicondutores são excelentes como material ativo para transistores eletrônicos e células solares.

Um grupo de pesquisadores da Universidade de Stanford, nos Estados Unidos, descobriram uma forma simples e rápida de separar os nanotubos. Trata-se de um polímero que tem uma predileção pelos nanotubos semicondutores, envolvendo-os inteiramente e permitindo sua separação. O polímero não adere aos nanotubos condutores. Já se havia tentado esta técnica antes, mas ela tropeçava na dificuldade para remover o polímero, deixando os nanotubos semicondutores limpos de novo. O polímero usado não precisa ser removido. O produto final é uma tinta eletrônica, que pode ser usada diretamente na fabricação de componentes eletrônicos.

O que sobra do processo é um conjunto puro de nanotubos metálicos, que poderão ser usados, sobretudo na criação de eletrodos mais eficientes para baterias recarregáveis [33].

Figura 2.7 – O nanotubo semiconductor é encapsulado pelo polímero, criando uma tinta eletrônica.



[Imagem: Francois Gygi and Giulia Galli][33].

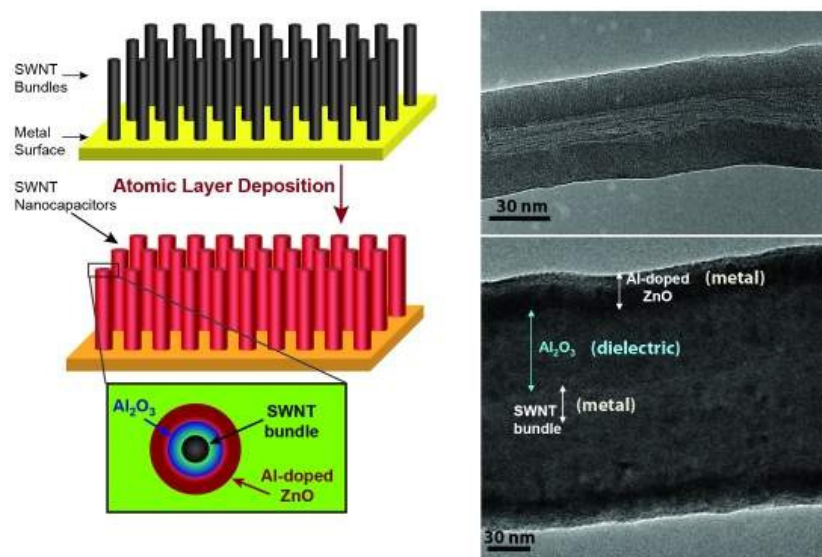
Pesquisadores da Universidade de *Rice*, nos Estados Unidos, imaginaram uma tecnologia de armazenamento de energia que permite desde a integração das baterias no próprio chip que irá alimentar, até seu uso em larga escala, formando usinas inteiras.

Os pesquisadores criaram um sistema de armazenamento de energia de estado sólido e recarregável, usando ultracapacitores feitos à base de nanotubos de carbono. Os capacitores comuns, que liberam rápidas rajadas de energia, podem ser descarregados e recarregados centenas de milhares de vezes. Já os capacitores elétricos de dupla camada (EDLC - *Electric Double Layer Capacitors*), mais conhecidos como ultracapacitores, são componentes híbridos que mantêm centenas de vezes mais energia do que um capacitor padrão, como uma bateria, mantendo a capacidade de carga e descarga rápidas. Mas os ultracapacitores até agora dependiam de eletrólitos líquidos ou de tipo gel, que deixam de funcionar em condições muito quentes ou muito frias.

A equipe de pesquisadores da Universidade de *Rice* coordenada pelo Dr. Rauge desenvolveu um material à base de óxidos que substitui inteiramente o eletrólito líquido, conforme se vê na Figura 2.8. Eles fizeram isto em nanoescala: a chave para uma elevada capacitância é a área disponível para os elétrons - e poucas estruturas conhecidas disponibilizam tanta área superficial em um espaço tão pequeno quanto os nanotubos de carbono. Usando uma técnica desenvolvida pela própria equipe para fabricar nanotubos de

grandes dimensões, os pesquisadores fizeram os nanotubos de carbono se aglomerarem em grupos com cerca de 15 a 20 nanômetros, com até 50 micrômetros de altura - uma relação altura/largura superior a 500 [35].

Figura 2.8 – O nanotubo pesquisado pela equipe do Dr. Rauge que vislumbra um carro elétrico no qual a bateria estaria distribuída por todo o veículo, incluindo chassi, portas, teto, piso, etc.



[Imagem: Rice University][35].

Esse carpete de nanotubos é posto sobre um eletrodo de cobre com camadas em escala atômica de ouro e titânio, para ajudar a grudar tudo e manter a estabilidade elétrica. O conjunto foi coberto com revestimentos muito finos de óxido de alumínio (o dielétrico) e óxido de zinco dopado com alumínio (o contra-eletrôdo) por meio de um processo chamado deposição de camada atômica. Um eletrodo superior de prata completa o circuito.

O ultracapacitor, nascido em nanoescala, é estável e escalável. Em tese, é possível construir usinas inteiras com eles, acumulando a energia gerada pelos ventos ou pelo Sol e liberando-a quando necessário. Desta forma, os pesquisadores da Universidade de *Rice* vislumbram um carro elétrico no qual a bateria estaria distribuída por todo o veículo, incluindo chassi, portas, teto, piso etc. Assim sendo, a nova tecnologia de baterias armazenará energia na lataria dos carros. Eles relataram que todas as soluções de estado sólido para armazenamento de energia poderão ser intimamente integradas nos aparelhos, incluindo telas flexíveis, bio-implantes, muitos tipos de sensores e todos os aparelhos eletrônicos que possam se beneficiar de taxas rápidas de carga e descarga [35].

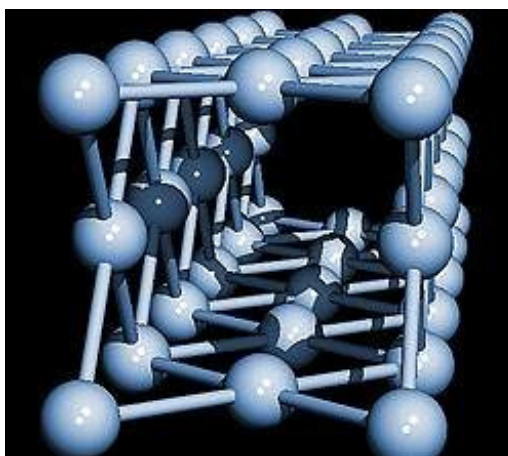
Recentemente, outro grupo de pesquisadores sugeriu o uso de nanocapacitores eletrostáticos, com o mesmo potencial.

Antes que qualquer dessas possibilidades ganhe uso prático, contudo, os cientistas terão que lidar com a "mania" dos capacitores de liberarem suas elevadas doses de energia de uma vez só - ao contrário das baterias, que têm menor densidade de energia, mas liberam de forma mais comedida.

A nanotecnologia é uma área de pesquisa extremamente ativa, com milhares de artigos publicados nos últimos anos. Em artigo publicado na revista *Nature Nanotechnology*, uma equipe formada por pesquisadores do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron do Ministério da Ciência e Tecnologia (LNLS/MCT) descreve a descoberta de uma inesperada família de nanotubos metálicos ocos e quadrados [36].

O estudo, coordenado pelos professores da Unicamp, identificou como se deformam, e finalmente quebram arames nanométricos de prata. No processo, foi observada a formação espontânea de estruturas com uma base quadrada composta por apenas quatro átomos, a menor possível, conforme Figura 2.9.

Figura 2.9 – Estrutura de um nanotubo de prata com seção quadrada.
Todos os nanotubos conhecidos até agora eram realmente tubos, redondos.



[Imagem: Daniel Ugarte][36].

Um dos pesquisadores associado do LNLS, Daniel Ugarte, afirmou que o arranjo atômico oco ou tubular é completamente inesperado e se forma quando os nanofios são submetidos a uma alta taxa de estiramento.

Assim, os átomos mudam sua distribuição ou estrutura para uma configuração que pode ser descrito como uma nanossanfona, capaz de se esticar muito sem quebrar. Nenhum trabalho anterior tinha considerado como possível a existência dessa forma de estrutura, nem mesmo do ponto de vista teórico especulativo.

O artigo descreve com detalhes atômicos todos os processos de alongação gerados por tensão mecânica, utilizando experimentos de microscopia eletrônica de transmissão com resolução atômica e simulações de dinâmica molecular.

As simulações computacionais sugerem que a estabilidade dessas estruturas pode ser o resultado de uma combinação de um tamanho mínimo necessário associado a um regime de alta tensão mecânica.

Os resultados obtidos fornecem informações essenciais para compreender o atrito e a adesão, assim como para avaliar a possível utilização de nanopêças metálicas como reforço estrutural ou condutor elétrico em nanodispositivos eletrônicos. A inesperada descoberta abre novas possibilidades para o estudo de nanoestruturas metálicas e sugere que talvez outras estruturas "exóticas" possam existir.

Praticamente todos os dados de que se dispõem hoje são obtidos por meio de simulações computacionais sem validação prática ou experimental. Como consequência, poucos avanços concretos tem sido possível. Nesse contexto, o estudo conduzido no LNLS/Unicamp destaca-se por trazer contribuições validadas experimentalmente sobre propriedades até então pouco conhecidas dos nanotubos metálicos [36]. Por outro lado, os capacitores armazenam energia como um campo elétrico, o que os torna mais eficientes do que as baterias tradicionais, que retiram sua energia de reações químicas. Já os ultracapacitores são células de armazenamento, funcionando no mesmo princípio dos capacitores, mas capazes de fornecer quantidades enormes de energia instantaneamente. Eles já são utilizados em veículos experimentais, principalmente aqueles movidos por células a combustível.

Até agora, porém, os ultracapacitores necessitavam ser muito maiores do que as baterias para fornecer a mesma quantidade de energia. Os cientistas resolveram o problema lidando com os campos elétricos em nível atômico. Eles utilizaram uma membrana, construída com nanotubos de carbono alinhados verticalmente.

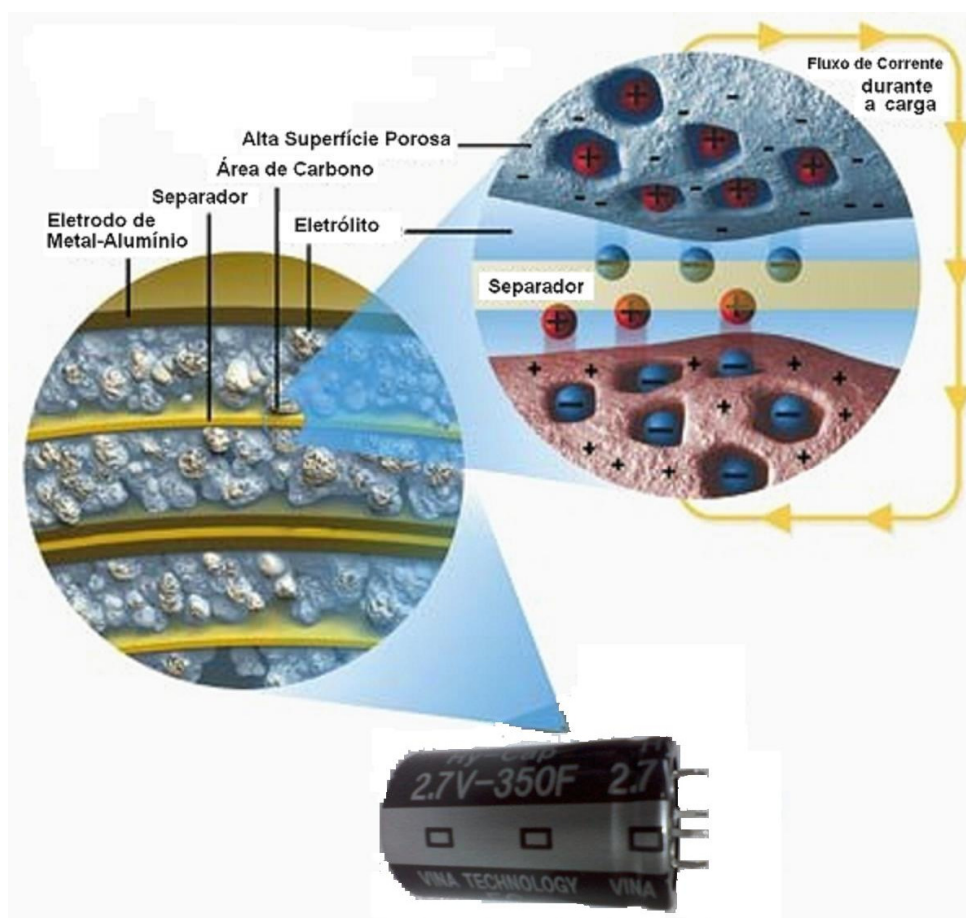
A capacidade de armazenamento de um ultracapacitor depende da área superficial de seus eletrodos. Atualmente esses eletrodos são feitos de carbono ativado, um material extremamente poroso, o que se traduz em uma enorme área superficial. Mas seus poros são irregulares, o que significa que essa área não é tão grande quanto poderia ser, reduzindo a eficiência do ultracapacitor [31].

Para se obter capacidades de armazenamento enormes, o que se faz no ultracapacitor é utilizar um eletrodo poroso à base de carbono, o qual é imerso numa substância condutora (eletrólito), conforme mostra a Figura 2.10.

O eletrólito penetra nos poros do carbono e reagindo forma uma película ultrafina, da ordem de *angstroms* cobrindo internamente todos os poros e atuando assim como dielétrico.

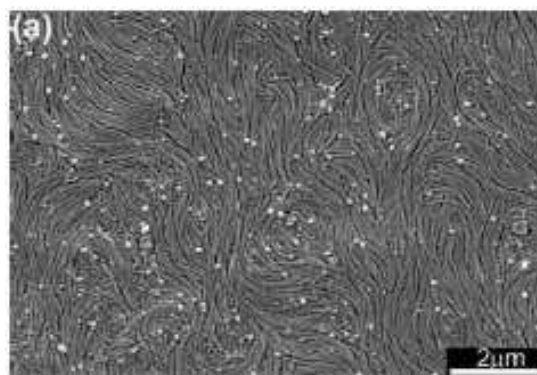
A superfície total ocupada pelo dielétrico é enorme já que se espalha internamente por todos os poros. Pode-se então obter uma densidade de capacitância até 100 vezes maior do que a que seria possível com as tecnologias de fabricação dos capacitores eletrolíticos convencionais [37].

Figura 2.10 – Corte transversal de um ultracapacitor



Pesquisadores da Universidade *UC Davis*, Estados Unidos, conseguiram desenvolver um método para depositar os nanotubos de carbono sobre folhas de níquel, mantendo-os perfeitamente alinhados e muito próximos uns dos outros. Devido ao seu diminuto tamanho, Figura 2.11, os nanotubos fornecem uma gigantesca área superficial, na qual a energia pode ser armazenada e depois liberada [38].

Figura 2.11 – Nanotubo de carbono sobre folha de níquel [38].

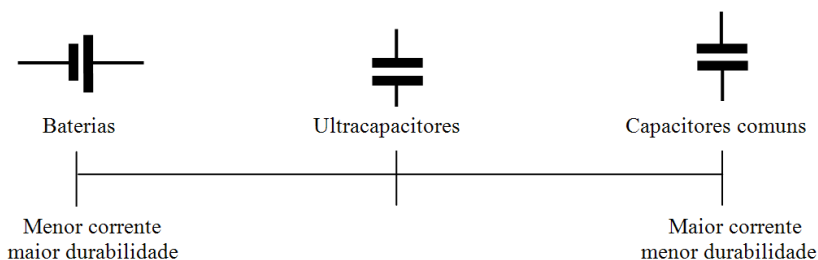


Os novos ultracapacitores podem armazenar energia numa densidade de 30 kilowatts por quilo (kW/kg), comparado com 4 kW/kg dos mais avançados capacitores hoje disponíveis comercialmente. Outros pesquisadores já haviam descrito ultracapacitores com capacidades de até 20 kW/kg.

Se, por um lado as baterias fornecem correntes pequenas durante intervalos de tempo longos e os capacitores podem ser usados para fornecer correntes intensas por curtíssimos intervalos de tempo, o projetista poderá em breve contar com uma solução intermediária: o ultracapacitor.

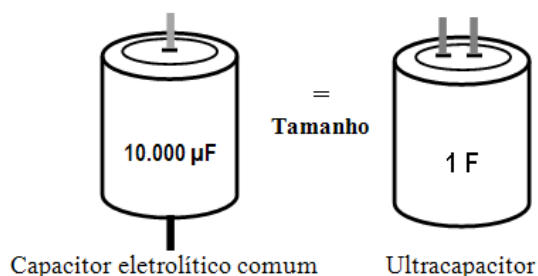
Usando tecnologias apropriadas é possível multiplicar a densidade de armazenamento de energia e com isso fabricar capacitores de valores tão elevados que permitem o armazenamento de quantidades de energia que sejam comparadas a que uma pilha ou bateria comum pode armazenar. Isso nos permite colocar o ultracapacitor como fonte de energia num ponto intermediário entre o capacitor comum e a bateria, conforme mostra a Figura 2.12 [37].

Figura 2.12 – Baterias, ultracapacitores e capacitores comuns.



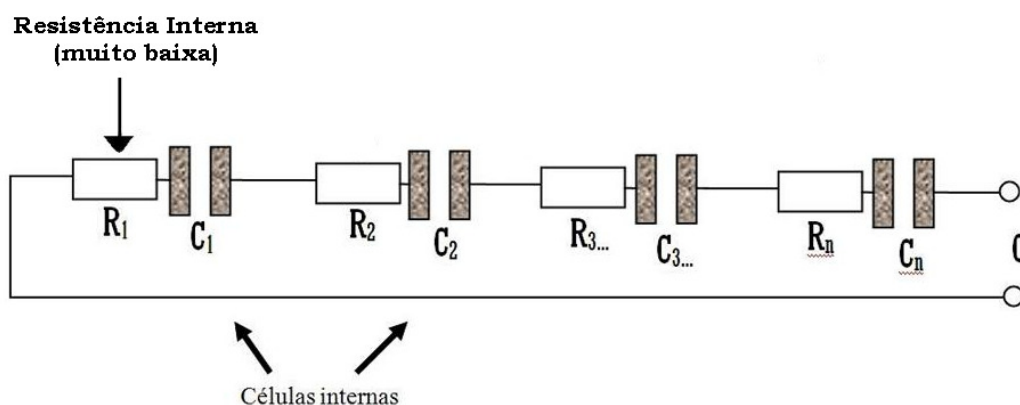
Verifica-se, visualmente, que dois capacitores do mesmo tamanho e mesma tensão de trabalho, sendo um eletrolítico comum e o outro um ultracapacitor, o ultracapacitor tem uma capacitância 100 vezes maior, conforme mostra a Figura 2.13.

Figura 2.13 – Capacitor eletrolítico comum e ultracapacitor.



Uma característica importante que é obtida nos ultracapacitores é sua baixíssima resistência em série, conforme se pode ver pelo circuito equivalente da Figura 2.14 e que limita a corrente de pico de descarga.

Figura 2.14 – Capacitores e ultracapacitores.



Os ultracapacitores têm resistências da ordem de fração de milésimo de Ohm. Assim, um capacitor de $0,1 \text{ m}\Omega$ com $2,5 \text{ V}$ é possível obter uma corrente de pico de 625 A .

Uma vantagem do ultracapacitor é a sua taxa super-rápida de carga e descarga, que é determinada exclusivamente por suas propriedades físicas. Uma bateria depende de uma reação química mais lenta para a energia. A desvantagem de um ultracapacitor é que atualmente eles armazenam uma quantidade menor de energia do que uma bateria.

Ultracapacitores são muito bons em captar de forma eficiente eletricidade a partir de frenagem regenerativa, e pode fornecer energia para aceleração tão rapidamente. Sem partes móveis, eles também têm uma vida útil muito longa - 500 mil ciclos a mais de carga/descarga. Ultracapacitores são atualmente utilizados para energia eólica, energia solar, e armazenamento da energia hídrica.

Um ultracapacitor, também conhecido como um capacitor de dupla camada polariza uma solução eletrolítica para armazenar energia elétrica estaticamente. Embora seja

um dispositivo eletroquímico, não são as reações químicas envolvidas no seu mecanismo de armazenamento de energia. Este mecanismo é altamente reversível, e permite que o ultracapacitor seja carregado e descarregado centenas de milhares de vezes.

Uma vez que o ultracapacitor é carregado e a energia armazenada, uma carga (por exemplo, motor do veículo elétrico) pode usar essa energia. A quantidade de energia armazenada é muito grande comparada a um capacitor padrão por causa da enorme superfície criada pelos eletrodos de carbonos porosos e a pequena separação do dielétrico.

Como um dispositivo de armazenamento, o ultracapacitor, baseia-se na separação de cargas microscópicas em uma interface eletroquímica para armazenar energia. Uma vez que a capacitância destes dispositivos é proporcional à área do eletrodo ativo, aumentando a área de superfície do eletrodo irá aumentar a capacitância, aumentando assim a quantidade de energia que pode ser armazenada. Esta conquista de elevada área superficial utiliza materiais como carvão ativado ou pós metálicos sinterizados. No entanto, em ambas as situações, há um limite intrínseco à porosidade destes materiais, ou seja, existe um limite superior para a quantidade de área de superfície que pode ser alcançado simplesmente fazendo partículas cada vez menores. Um método alternativo deve ser desenvolvido para aumentar a superfície ativa do eletrodo sem aumentar o tamanho do dispositivo. Um eletrodo muito mais eficiente para dispositivos de armazenamento de energia elétrica poderia ser idealizado se a área da superfície puder ser significativamente aumentada.

Um capacitor tradicional acumula energia no campo elétrico criado pela separação das cargas elétricas. Este campo existe no dielétrico que se torna polarizado. A capacitância é proporcional à permissividade do material e à área das placas, sendo inversamente proporcional à distância entre as placas.

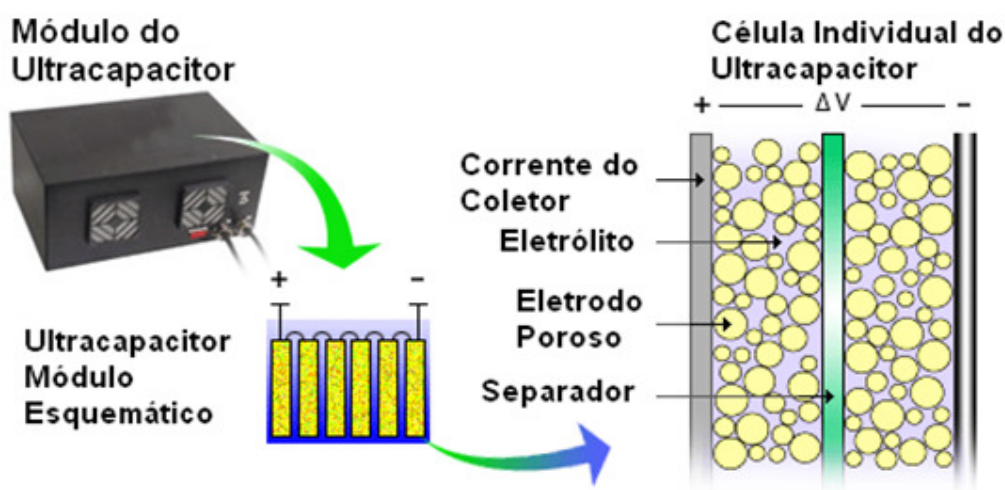
Já em um ultracapacitor não há um dielétrico, mas um eletrólito. A principal diferença é a grande área propiciada por materiais porosos, aliada à pequena distância entre as cargas, que é da ordem de nanômetros. Com um eletrólito aquoso, a tensão por capacitor é de cerca de 1 V, enquanto para um eletrólito orgânico este valor cresce para 2,5 V.

Hermann Helmholtz, em 1853, descreveu que quando uma tensão é aplicada entre dois eletrodos de carbono, imersos em um fluido condutor, não há circulação de corrente até que uma certa tensão limiar seja atingida. Ao se iniciar a condução há também a formação de gás devido à reação química na superfície dos eletrodos. Abaixo desta tensão limiar o dispositivo se comporta como um capacitor [39].

Diferentemente de uma bateria, não há acúmulo de energia química. Em torno de um eletrodo poroso de carbono situa-se o eletrólito, carregado de cargas. Na realidade,

conforme mostra a Figura 2.15, há dois eletrodos e, nas adjacências de cada um, ocorre o acúmulo de íons positivos e negativos. O separador isola os eletrodos, mas permite a livre passagem dos íons. Por esta razão estes dispositivos são também denominados capacitores de dupla camada.

Figura 2.15 – Módulo esquemático do ultracapacitor

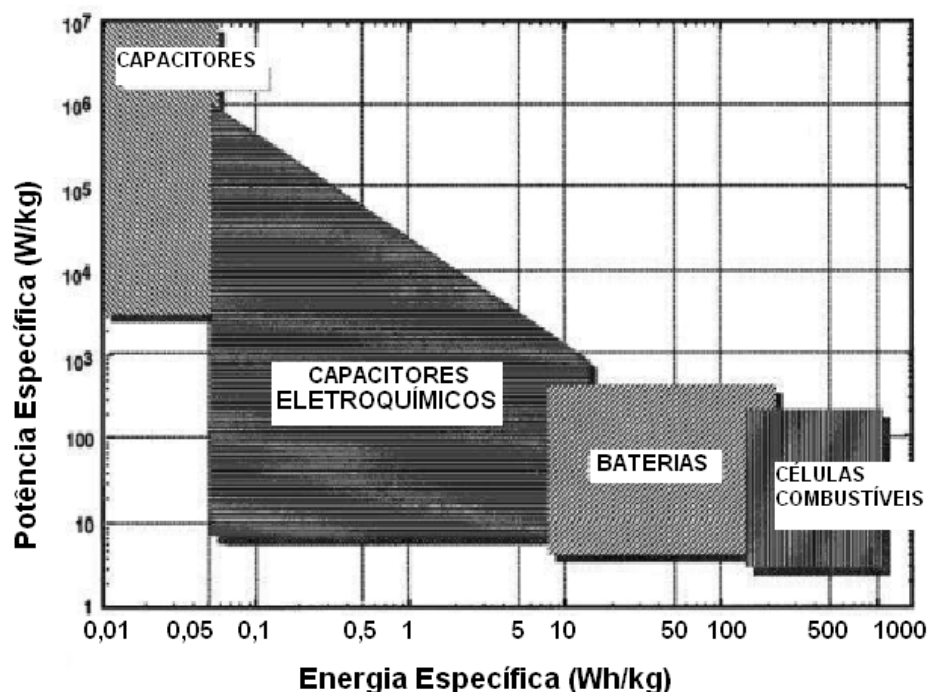


Do ponto de vista de uma aplicação, a principal diferença entre um ultracapacitor e uma bateria é o fato da bateria ter um melhor desempenho como fonte de energia, enquanto o ultracapacitor tem um comportamento superior em termos de fonte de potência. Ou seja, para uma dada tensão, um ultracapacitor é capaz de responder a uma demanda de corrente de maneira muito mais rápida do que uma bateria, o que se deve a uma resistência interna muito menor.

No entanto, mesmo podendo atingir capacitâncias muito elevadas (da ordem de milhares de Farads), a energia acumulada, mercê da baixa tensão, é muito inferior à que se consegue numa bateria com volume/peso equivalente. A Figura 2.16 mostra um mapeamento de diferentes dispositivos de acúmulo de energia em função de densidade de potência e de energia, chamado diagrama de *Ragone*.

Nota-se que os ultracapacitores, na Figura 2.16 designados como capacitores eletroquímicos, podem apresentar densidade de potência similar a um capacitor eletrolítico, o que significa que o produto tensão x corrente é similar. No entanto, a densidade de energia é de uma a duas ordens de grandeza superior, o que significa que um ultracapacitor é capaz de acumular muito mais energia. Em relação às baterias e células a combustível, apresentam densidade de energia muito menor, mas com densidade de potência muito mais elevada [40].

Figura 2.16 – Mapa comparativo de características de densidade de potência e de energia de diferentes dispositivos de acúmulo [40].



Pode-se definir que a energia específica é uma medida da quantidade de energia total armazenada por unidade de peso do acumulador. A potência específica é uma medida que quantifica a potência por unidade de peso, possível de ser fornecida ou absorvida pelo acumulador, para atender aos picos de demanda em acelerações e aclives, no caso de veículos automotores e máquinas pesadas.

Conforme citado em [40], a primeira patente deste tipo de dispositivo é de 1957 [41], com os primeiros componentes aparecendo no mercado em 1970 [42], com o chamado SOHIO. Mas apenas nos anos 90 os ultracapacitores começaram a ter um uso mais intenso.

Ultracapacitores são produtos oferecidos em uma ampla gama de tamanhos. Isto permite sua utilização por uma variedade de indústrias para muitos requisitos de necessidades de energia. Estas aplicações vão desde miliamperes de energia atual ou miliwatts a várias centenas de amperes de corrente ou várias centenas de quilowatts de energia. Indústrias empregam ultracapacitores em sua produção que incluem eletrônica de consumo, tração, automotivos e industriais. Exemplos no âmbito de cada indústria são numerosos.

Automotiva - redes em 42 V para suprimento de alimentação de veículos, direção hidráulica, controle de válvula eletromagnética, geradores de partida, abertura de porta elétrica, travagem regenerativa, acionamento elétrico híbrido, cintos de segurança com restrições ativas [43].

Transporte - motor diesel de partida, inclinação de trem, abertura de porta de segurança, fonte de alimentação elétrica, compensação de queda de tensão, travagem regenerativa, acionamento elétrico híbrido [43].

Consumidor - câmeras digitais, computadores *laptop*, assistente digital pessoal (*PDA - personal digital assistant*), sistema de posicionamento global (*Global Positioning System - GPS*), dispositivos de mão, brinquedos, lanternas, iluminação solar e dispositivos de paginação para restaurantes [43].

Industrial - fonte de alimentação ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply - UPS*), sistemas eólicos com turbinas de passo, armazenamento temporário de energia, leitura de medidor automatizada (*Automatic Meter Reading - AMR*), elevador de *backup* de energia de microcontrolador, portas de segurança, empilhadeiras, guindastes e telecomunicações [43].

A Consideração para as várias indústrias listadas, e para muitas outras, normalmente é atribuída às necessidades específicas da aplicação da tecnologia que o ultracapacitor pode satisfazer. Aplicações ideais para ultracapacitores incluem pulso de energia, potência ponte, de força principal e *backup* de memória [43].

Por os ultracapacitores terem baixa impedância interna, eles são capazes de transportar correntes elevadas e são muitas vezes colocados em paralelo com as baterias para carregar os níveis das baterias, prolongando a vida da bateria. Esta metodologia é empregada para dispositivos como câmeras digitais, sistemas de acionamento híbridos e frenagem regenerativa (para recaptura da energia).

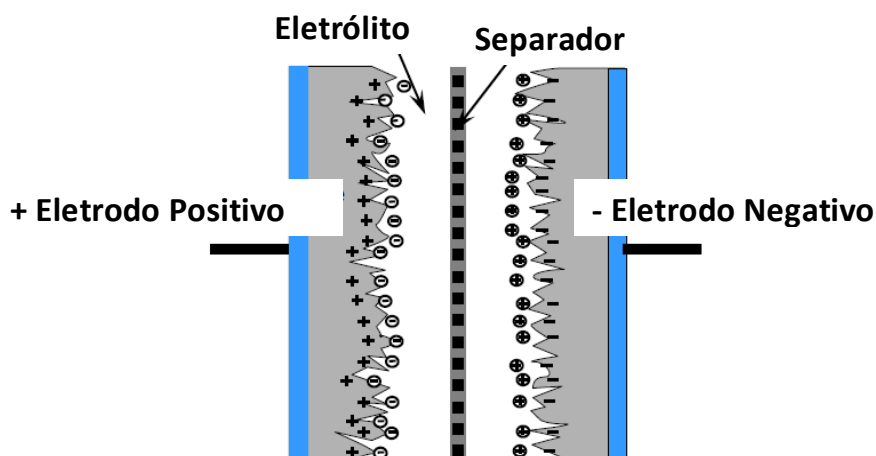
As aplicações que se beneficiariam mais são as que exigem rápido carregamento e descarregamento de uma grande quantidade de energia. Por exemplo, somente ultracapacitores podem capturar e armazenar grandes quantidades de energia elétrica re-gerada durante a frenagem e liberá-lo rapidamente para reaceleração em veículos híbridos. Mesmo com pequeno uso nos atuais carros híbridos leves como micro-ônibus, a economia de energia pode adicionar até 15% na economia de combustível. Usado em meios de transportes ainda maiores, como sistemas de armazenamento de energia em trens elétricos, bondes e metrô, essa economia pode facilmente aumentar em até 25% da quantidade de energia utilizada.

O ultracapacitor goza de potencial crescimento ilimitado, pois ele responde a mercados-chave que também atendem às necessidades sociais de nosso tempo: é amigo do meio ambiente, ajuda a conservar energia, e melhora o desempenho de poupança de energia de outros aparelhos, quando utilizado em conjunto.

Ultracapacitores comerciais estão disponíveis em várias capacitâncias desde valores baixos até em torno de 3000 F, como exemplo de um no valor de 2600 F, 2,5 V, pesando 0,5 kg e ocupando um volume de 500 cm³ ou em módulos integrados de 145 F, 42 V, pesando 16 kg e ocupando em torno de 21 dm³.

As especificidades de construção do ultracapacitor são dependentes da aplicação e da utilização. Os materiais podem diferir ligeiramente por fabricante ou devido às necessidades específicas da aplicação. O ponto comum entre todos os ultracapacitores é que eles consistem de um eletrodo positivo, um eletrodo negativo, um separador entre os dois eletrodos, e um eletrólito de enchimento nas porosidades dos dois eletrodos e separador, conforme se vê na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Separação de carga no ultracapacitor [43].



A montagem dos ultracapacitores pode variar de produto para produto. Isto é devido, em parte, à geometria da embalagem do ultracapacitor. Para produtos com um arranjo de embalagem prismática ou quadrada, a construção interna é baseada em um arranjo de montagem de empilhamento com pás internas do coletor de extrusão a partir de cada pilha de eletrodos. Estas pás coletoras de corrente são, em seguida, soldadas aos terminais para permitir um percurso de corrente do lado de fora do ultracapacitor.

Para produtos com embalagens redonda ou cilíndrica, os eletrodos são enrolados em uma configuração em forma de rolo. Os eletrodos têm extensões de tiras que são então soldadas aos terminais para permitir um percurso de corrente do lado de fora do ultracapacitor.

A Tabela 2 mostra a comparação de preços dos ultracapacitores de quatro fabricantes. Os preços pesquisados correspondem aos componentes utilizados no projeto com tensão 2,7 V e capacitância 350 F. No início da pesquisa tais produtos eram mais

convenientes para compra, tanto pelo preço estimado quanto à facilidade para aquisição, tamanho e manuseio, visto que são todos importados de outros continentes.

Tabela 2 – Comparação de preços de ultracapacitores 2,7 V 350 F por fabricante [43].

Fabricante	Modelo	Dimensões	ESR DC (mΩ)	Energia / Potência (máxima)	Preço (US\$)
Ioxus	RSC2R7357ST EDLC SCREW	D = 35 mm L = 62 mm	2,5	5,94 Wh/L 13,9 kW/L	12.91
Ioxus	RSC2R7357SR EDLC SNAP-IN	D = 35 mm L = 59 mm	3,2	6,4 Wh/L 10,2 kW/L	10.98
Ioxus	RSC2R7357S4 EDLC SNAP-IN	D = 35 mm L = 62 mm	2,7	5,9 Wh/L 12,6 kW/L	11.50
Vina	VEC2R7357QG 4 pinos	D = 35 mm L = 60 mm	3,5	6,1 Wh/L	19.50
Maxwell	BCAP0350-E270-T11	D = 33 mm L = 61 mm	3,2	5,9 Wh/kg 4,6 kW/kg	21.08
Cornell Dubilier	CDLC351K2R7SR SNAP-IN 2 pinos	D = 35 mm L = 59 mm	3,2	273 W 4,1 kW/kg	28.66
Cornell Dubilier	CDLC351E2R7T11 4 pinos radial	D = 33,3 mm L = 61,5 mm	3,2	276 W 4,6 kW/kg	17.40
Cornell Dubilier	CDLC351K2R7S4 Multipinos radial	D = 35,3 mm L = 62 mm	2,7	324 W 4,9 kW/kg	29.89

EDLC – Electric Double Layer Capacitor (capacitor elétrico de dupla camada).

ESR – Equivalent Series Resistance (resistência série equivalente)

CDLC – Carbon Double Layer Cell (célula de carbono com dupla camada)

Há várias companhias fabricantes de ultracapacitores, como a Maxwell Technologies nos Estados Unidos [43], a Siemens Matsushita (através da EPCOS na Alemanha) [44], NEC-Tokin [45], ELNA [46], AVX [47], Evans [48], Panasonic Industrial no Japão[49], Vina Technology [50] e Ness [51] ambas da Coreia do Sul, Korchip (Coreia do Sul) [52], Nippon Chemi-con (Japão) [53], Skeleton (Alemanha) [54], etc.

2.3.1 Comparações entre Baterias x Ultracapacitores

Dois tipos de baterias são utilizadas atualmente em painéis fotovoltaicos: baterias de chumbo (ácidas) e baterias de cádmio níquel (alcalinas). As baterias de cádmio níquel (alcalinas) só são utilizadas em locais com condições climáticas adversas ou em locais em que é necessário grande confiabilidade. Quando se escolhe uma bateria para um sistema PV deverão se ter em conta, para além da tensão nominal, fatores como:

- gama de temperaturas admissíveis (-15°C até +50°C)
- taxa de autodescarga (2% por mês a 25°C)
- tempo de vida (1800 ciclos com 80% de profundidade de descarga)
- eficiência de carga desde 20% descarregada

- capacidade (Ah) para descargas de 10h
- frequência requerida para restabelecer os níveis de eletrólito
- peso, resistência à sobrecarga e custo.

Não existe um mercado específico para baterias destinadas a sistemas PV. As baterias mais comuns são as baterias de automóveis/caminhões pesados que estão dimensionadas para fornecer elevadas correntes em curtos intervalos de tempo. Estas baterias, embora baratas, não são as mais aconselháveis, para sistemas PV, pois o seu tempo de vida é muito curto quando aplicadas em sistemas com elevadas profundidades de descarga.

As baterias seladas são baterias de ácido desenvolvidas propositadamente para sistemas PV. Estas baterias são mais caras e não suportam temperaturas extremas, como as baterias convencionais, mas tem a vantagem de não ser necessário restabelecer os níveis de eletrólito.

As baterias NiCd são baterias robustas, leves, resistentes a temperaturas extremas, tem baixas taxas de autodescarga e aguentam perfeitamente profundidades de descarga que podem chegar abaixo dos 10%. Uma desvantagem é o fato de diminuir a sua capacidade com o aumento do número de ciclos de descarga. Outra desvantagem é o seu elevado preço.

A Tabela 3 traça um quadro comparativo entre as vantagens x desvantagens entre as baterias e os ultracapacitores.

Tabela 3 – Comparações entre Ultracapacitores x Baterias.

Ultracapacitores	Baterias
	
• Armazena carga física. • Maior densidade de potência em até 10 vezes. • Baixa densidade de energia. • Mais rápido – eficiência de ciclo alta (>95%). • Milhões de ciclos de carga/descarga. • Não necessita de manutenção. • Ampla faixa de temperatura (-30°C a 65°C). • Eficiência do ciclo pode ser acima de 95%. • Menor resistência interna.	• Armazena carga química. • Baixa densidade de potência. • Alta densidade de energia. • Mais lenta. • Milhares de ciclos de carga/descarga. • Exige manutenção. • Faixa de temperatura mais limitada. • A tensão varia com a energia armazenada.
• Não provoca danos ambientais/baixa toxicidade de materiais usados/energia verde. • Menor peso, boa reversibilidade. • Não têm efeitos de memória, não pode ser totalmente descarregado. • Vida útil longa, em torno de 10 anos.	1. A quantidade de energia armazenada por peso de unidade é consideravelmente mais alta.
• Capacidade de recarga superior: praticamente, a vida útil dos ultracapacitores independe da quantidade de recargas e do nível de descarga, podendo ser descarregado completamente e recarregados sucessivas vezes.	2. Pequena longevidade das baterias.
• Tendência à autodescarga superior: esta característica não representa problema no caso do veículo híbrido, pois o tempo para carga e descarga devido à operação do veículo é bem inferior que a constante de tempo de autodescarga.	3. Sérias restrições quanto ao ciclo de recarga. Elas possuem um tempo relativamente longo de carga, ou seja, devem ser carregadas com uma potência baixa para não comprometer a sua vida útil.

A Tabela 4, informada por [43], mostra um comparativo entre o ultracapacitor, a bateria chumbo-ácido e o capacitor convencional.

Tabela 4 – Comparação bateria x ultracapacitor [43].

Característica	Bateria Chumbo-Ácido	Ultracapacitor	Capacitor Convencional
Energia específica (Wh/kg)	10 a 100	1 a 10	<0,1
Potência específica (kW/kg)	<1	<10	<100
Tempo de carga	1 a 5h	0,3 a 30s	10^{-3} a 10^{-6} s
Tempo de descarga	0,3 a 3h	0,3 a 30s	10^{-3} a 10^{-6} s
Vida útil (ciclos)	1000	>500.000	>500.000
Eficiência (carga/descarga)	0,7 a 0,85	0,85 a 0,98	>0,95

2.4 Transceptor

Neste tópico será apresentado um estudo abreviado do funcionamento do transceptor. Um transceptor é um dispositivo que combina um transmissor e um receptor utilizando componentes de circuito comuns para ambas as funções num só aparelho.

O Transceptor Monocanal é um equipamento especialmente projetado para realizar uma perfeita extensão da linha telefônica, sem fios e sem postes. Este equipamento permite ao usuário ter acesso a um telefone, onde necessitar, vinculando-o de forma radioelétrica a uma central telefônica pública ou privada, ou a uma extensão de linha telefônica particular.

O Rádio monocanal é composto de duas unidades compactas e robustas; a unidade "CENTRAL" que vai conectada a uma linha telefônica e a unidade "ASSINANTE" a qual se conecta um telefone comum, fax, computador, telefone sem fio, entre outros aparelhos.

Desta maneira os serviços de telefonia poderão extender-se de forma remota a todo lugar que seja necessário (Propriedades Rurais, Usinas, Empresas, Postos de Combustíveis em Rodovias, Canteiros de Obras, Campos Petrolíferos e de Mineração), onde não exista a possibilidade de instalação direta de uma rede telefônica ou onde os custos de implantação de linha física são elevados.

2.4.1 Funcionamento do Transceptor

Nesse estudo uma estação de radiocomunicação é o sistema utilizado para executar contatos à distância entre duas estações, que é composta basicamente de um transceptor (TRANSMissor-reCEPTOR) de radiocomunicação, de uma linha de transmissão (ar) e de uma antena. A este sistema se dá o nome de sistema irradiante. Um sistema de radiocomunicação normalmente é formado por dois componentes básicos: Transmissor e Receptor.

O transmissor é composto por um gerador de oscilações, que converte a corrente elétrica em oscilações de uma determinada frequência de rádio; um transdutor que converte a informação a ser transmitida em impulsos elétricos equivalentes a cada valor, um modulador, que controla as variações na intensidade de oscilação ou na frequência da onda portadora, sendo efetuada em níveis baixo ou alto, e uma antena para emitir as ondas eletromagnéticas.

O receptor que tem como componentes principais: a antena para captar as ondas eletromagnéticas e convertê-las em oscilações elétricas; amplificadores que aumentam a intensidade dessas oscilações; equipamentos para demodulação; um alto-falante para

converter os impulsos em ondas sonoras e na maior parte dos receptores osciladores para gerar ondas de radiofrequência que possam se misturar com as ondas recebidas. O receptor de rádio tem como função fazer a decodificação dos sinais eletromagnéticos recebidos do espaço, captados pela antena, transformando-os em ondas sonoras, sinais digitais e/ou analógicos.

A demodulação corresponde ao processo de se extrair a informação do sinal recebido, normalmente corrompido por ruído [56].

O sistema rádio ponto a ponto, conhecido também como radiovisibilidade ou *links* terrestres, constituiu-se por muito tempo como o principal meio de transmissão de alta capacidade. Mas, nosso estudo proposto é para um sistema de transporte de baixa capacidade, um radioenlace monocal ponto a ponto que é utilizado em grande escala no Brasil e no mundo.

Em um sistema de radiovisibilidade, a informação é transportada entre duas estações distantes entre si até 50 km ou mais, dependendo das condições topográficas, faixa de frequências e capacidade, graças ao fenômeno da propagação eletromagnética no ar.

O termo radiovisibilidade (do inglês “line of sight”) vem do fato de que deve haver visada entre as duas estações, ou para ser mais preciso, entre as duas antenas, ou seja, uma antena deve “enxergar” a outra para que o sinal recebido tenha uma amplitude suficiente para obter uma boa qualidade.

Basicamente, o sistema de cada estação é composto por um conjunto de transceptores, uma linha de transmissão e um elemento irradiante.

Quanto à linha de transmissão, permite a transferência do sinal modulado no transceptor até o elemento irradiante, sinal este chamado de portadora.

Finalmente, o elemento irradiante, conhecido por antena, é um transdutor de energia elétrica para eletromagnética no lado da estação receptora, permitindo a recuperação da informação inicial.

O termo “ponto a ponto” está relacionado ao fato da comunicação em nível de radioenlaces ser sempre realizada entre duas estações, ou seja, um único conjunto de receptores, localizado em uma única estação, recebe o sinal de um único conjunto de transmissores também localizado em uma única estação [57].

Nesse trabalho para funcionar o ponto de acesso à rede pública de telecomunicações foi utilizado um rádio transceptor monocal da STS Telecom, com frequência de transmissão de 259,000 MHz, potência de radiofrequência RF de 1,5 W a ser ativado em uma comunidade rural afastada em até 50 km ou mais, dependendo da topografia do terreno, da rede de atendimento básico da concessionária do serviço de telecomunicações,

passando a ser chamado nessa pesquisa de assinante B. O terminal telefônico que fica na cidade, nesse trabalho será chamado de assinante lado central, ou assinante A. Onde o sistema é ponto a ponto e pode ser utilizado com a finalidade de acessar a rede mundial de computadores – Internet ou realizar uma chamada telefônica para qualquer local do mundo.

O transceptor, modelo MC-25S utilizado nesse estudo, possui um duplexador que foi projetado pelo fabricante STS para possibilitar a operação duplex do transmissor e do receptor numa única antena. O duplexador é utilizado em rádios transceptores VHF na faixa de 242 a 262 MHz e é composto basicamente por dois filtros, um para transmissão e outro para recepção, cuja função é separar a faixa de transmissão da recepção.

Nas especificações fornecidas pelo Manual Técnico do fabricante do transceptor [58], a potência de transmissão do equipamento é 10 W, a alimentação 13,75 Vcc, as correntes de consumo em repouso $\leq 0,25$ A e com o transmissor ligado $\leq 2,7$ A. O transceptor adquirido tem potência de 1,0 W na saída de RF (Radiofrequência).

2.5 Revisão Bibliográfica dos Conversores

Neste tópico são descritos os tipos de conversores com suas topologias, características, vantagens e desvantagens para que possa orientar a melhor topologia para o projeto.

De acordo com o item 1.5, o sistema proposto é composto por dois conversores CC/CC; conversor elevador como carregador para os ultracapacitores e conversor abaixador para a alimentação da carga. Os dimensionamentos dos conversores serão detalhados no capítulo seguinte.

2.5.1 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída [2]. A frequência de comutação ou de chaveamento (*switching frequency* - F_s) corresponde ao número de ocorrências de um evento repetido por unidade de tempo. Esta frequência tende a ser a mais alta possível, diminuindo assim o volume dos elementos magnéticos e capacitivos do conversor.

O intervalo de comutação é definido pela Equação 1.

$$T_S = \frac{1}{F_S} \quad (1)$$

A razão entre o intervalo de comutação (T_S) e o intervalo de condução do interruptor S (T_{on}) é definido por razão cíclica e dada pela Equação 2.

$$D = \frac{T_{on}}{T_S} \quad (2)$$

A tensão média na saída deste conversor é calculada pela Equação 3.

$$V_O = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_{on}} V_i dt = V_i \frac{T_{on}}{T_S} \quad (3)$$

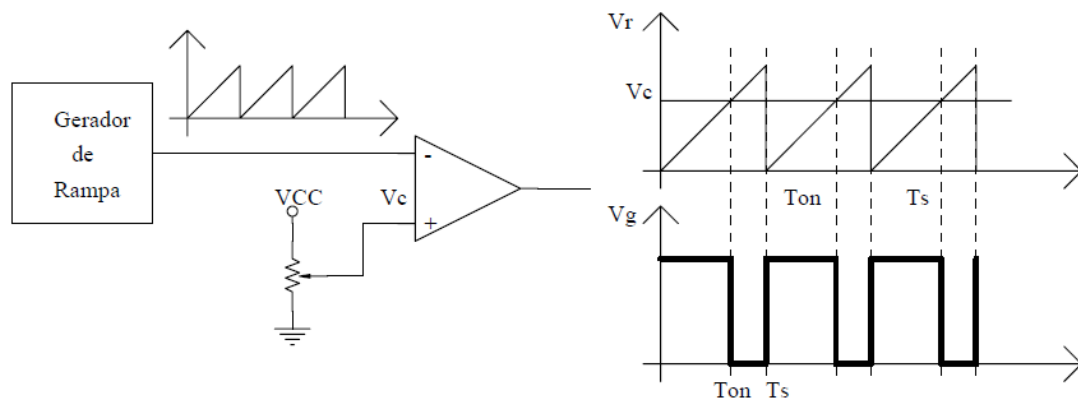
Usando $T_{on} = DT_S$ tem-se: $V_O = DV_i$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida como ganho estático do conversor e dada então pela Equação 4.

$$D = \frac{V_O}{V_i} \quad (4)$$

Os sinais de comando do interruptor podem ser gerados com frequência de comutação fixa ou variável. Uma forma de gerar os sinais de comando com frequência fixa é através de modulação por largura de pulso (PWM). Na Figura 2.18 é mostrada uma forma simples de realizar PWM.

Figura 2.18 – Exemplo de um circuito PWM [2].

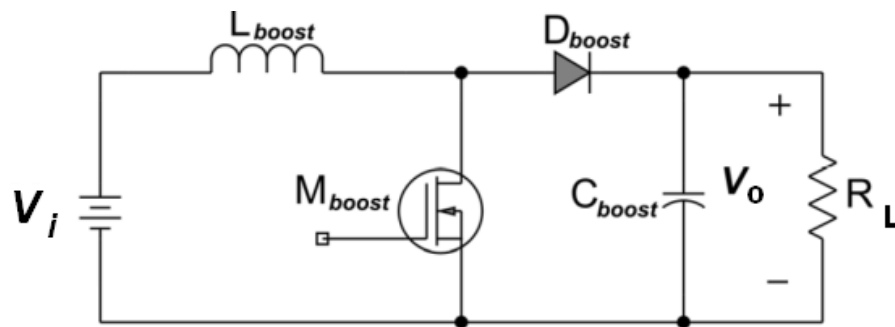


2.5.2 Conversor Boost

O conversor *boost* é um conversor elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. Na Figura 2.19 mostra-se o diagrama elétrico do conversor *boost*.

A topologia do conversor elevador de tensão, conhecida por conversor *boost* [2] está representada na Figura 2.21. Esta família de conversores é amplificadora de tensão, ou seja, a tensão média de saída é sempre superior à tensão de entrada e apresenta como características, fonte de corrente na entrada devido ao indutor em série com a fonte de tensão e uma fonte de tensão na saída pela presença do capacitor filtro de saída. As principais aplicações desse conversor são em fontes de alimentação, retificadores com alto fator de potência e no acionamento de motores de corrente contínua com frenagem regenerativa transformando seu diodo em chave controlada [60].

Figura 2.19 – Conversor elevador de tensão (*boost* clássico) [5].



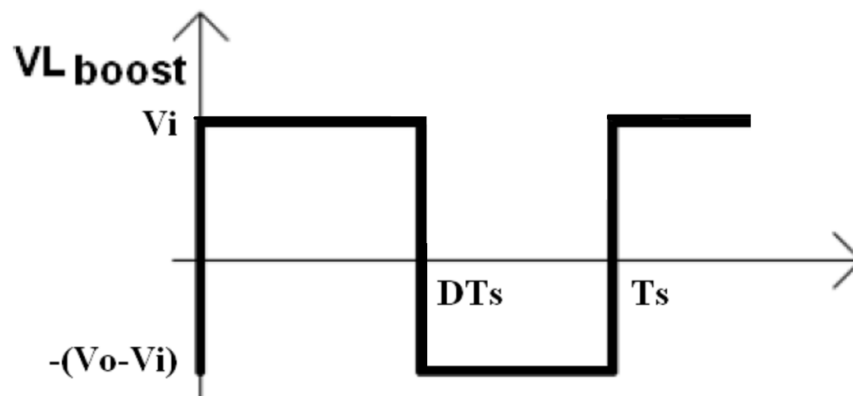
As etapas de funcionamento do conversor *boost* são descritas a seguir.

1ª Etapa (0, DT_s): M_{boost} está conduzindo. O indutor L_{boost} é magnetizado. A fonte V_i fornece energia ao indutor.

2ª Etapa (DT_s , $(1-D)T_s$): M_{boost} está bloqueado. O diodo D_{boost} entra em condução. A fonte V_i e o indutor L_{boost} fornecem energia à saída. A tensão na carga aumenta.

A forma de onda da tensão sobre o indutor L_{boost} é mostrada na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Tensão sobre o indutor do *boost* [34].



Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então a Equação 5 é

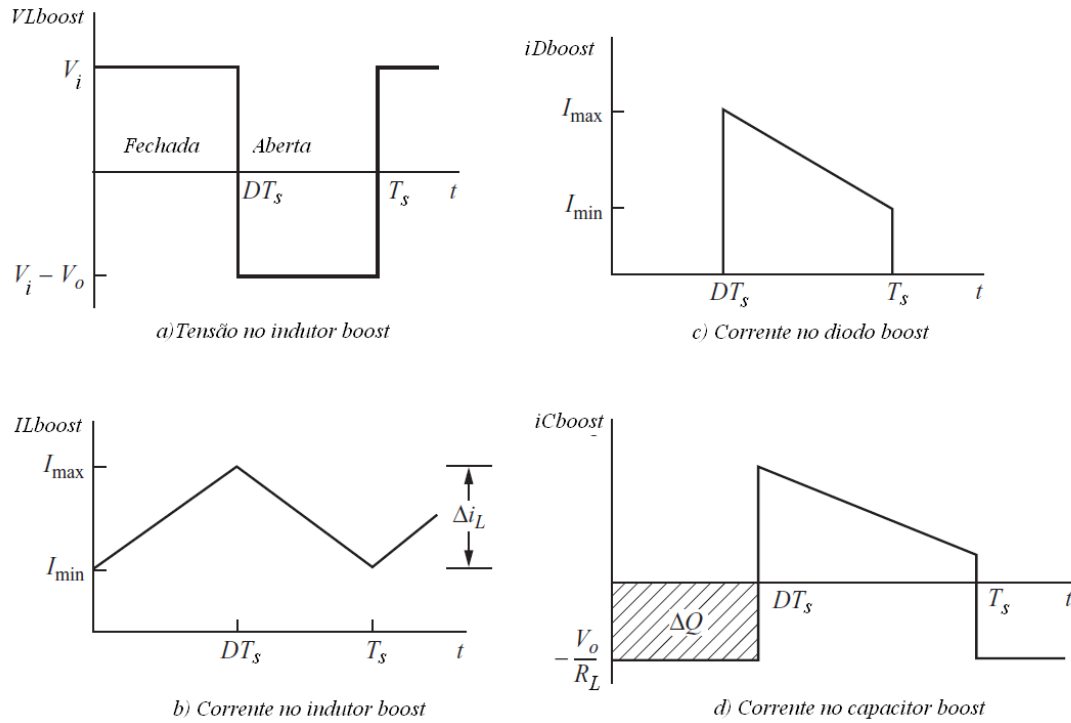
$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (V_o - V_i) dt \quad (5)$$

A razão cíclica é dada pela Equação 6.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (6)$$

As principais formas de onda do conversor *boost* no modo de condução contínua são mostradas na Figura 2.21.

Figura 2.21 – Principais formas de onda do conversor *boost* [34].



As principais características do conversor *boost* são:

- ✓ Corrente não pulsada na entrada;
- ✓ Pode apenas aumentar a tensão na saída;
- ✓ A corrente de saída é descontínua;
- ✓ A corrente na entrada tem boa qualidade;
- ✓ Baixo custo, peso e volume;
- ✓ Alto rendimento;
- ✓ Reduzido número de componentes.

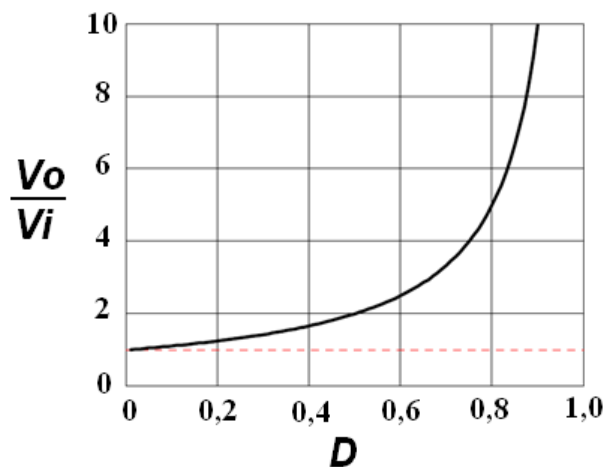
2.5.3 Topologia do Conversor Elevador

Para diminuir a corrente de entrada do conversor que eleva a tensão dos ultracapacitores para alimentar a carga e consequentemente minimizar as perdas por condução dos interruptores, optou-se por uma tensão máxima do banco de ultracapacitores em 29,7 V. Contudo, esta especificação limitou ao uso de um conversor CC/CC do tipo elevador de tensão, sendo que o conversor escolhido foi o *boost*. Para evitar sobretensão nos elementos armazenadores durante a programação de controle do dsPIC, limitou-se a tensão em 21 V, suficiente para alimentar o transceptor de 13,75 V.

Como o conversor *boost* pode operar em modo de condução contínua, sendo que esta característica possibilita a diminuição da ondulação de corrente na entrada e, consequentemente, melhora à sintonia do ponto de máxima potência. Mesmo com a utilização de um filtro na entrada, a condução contínua possibilita a sua redução.

A característica de transferência do conversor *boost* operando em modo de condução contínua dada pela Equação 6 pode ser demonstrada graficamente através da Figura 2.22.

Figura 2.22 – Apresentação gráfica da característica de transferência do conversor *boost* [2].



O painel fotovoltaico no ponto de máxima potência pode se comportar tanto como fonte de corrente como fonte de tensão. O primeiro comportamento não é interessante para o conversor *boost* uma vez que quando alimentado por uma fonte de corrente constante a sua tensão de saída será reduzida à medida que a razão cíclica aumenta [5].

Na topologia proposta composta pelo conversor *boost* clássico, como controlador da carga dos ultracapacitores, escolhido pela sua simplicidade e eficiência, pela necessidade de elevar a tensão V_i (painel fotovoltaico) para V_o (carga dos ultracapacitores) e porque o controle utilizando MPPT tem resultados satisfatórios quando utiliza conversores *boost*, então

se escolhe o *boost* pela necessidade de elevar a tensão. Escolhido pela sua simplicidade topológica, seu alto ganho de tensão, e porque a tensão sobre a chave controlada é menor que a metade da tensão de saída, que possibilita a utilização da chave MOSFET, e a chave é naturalmente grampeada por um dos capacitores de saída que evita a instalação de *snubbers* dissipativos.

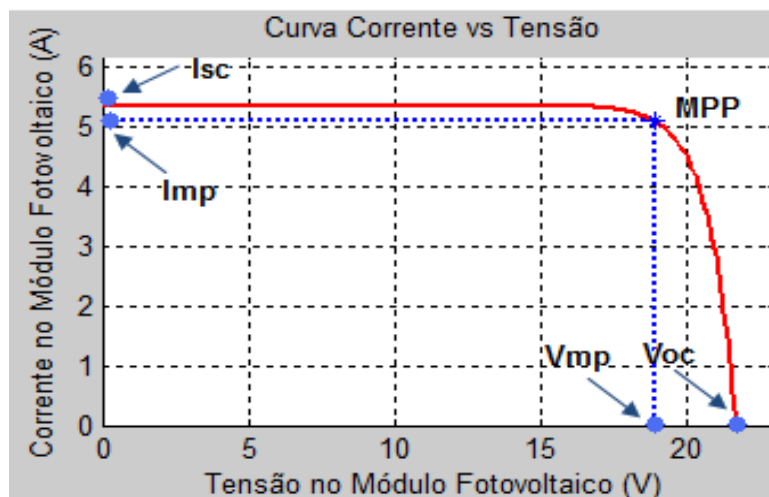
2.6 Técnicas de MPPT

O uso dos painéis fotovoltaicos apresentam vantagens na geração de energia devido a sua eficiência na conversão, mas o custo para sua implantação ainda é considerado elevado, tornando-se necessário a utilização de técnicas de extração da máxima potência do painel fotovoltaico. Neste trabalho, são citadas várias técnicas de rastreamento do Ponto de Máxima Potência - MPPT que são usadas em sistemas fotovoltaicos, dentre elas destacam-se: Técnica de Tensão Constante (*CV – Constant Voltage*), Técnica de Corrente Constante (*CC – Constant Current*), Técnica de Condutância Incremental (*IncCond – Incremental Conductance*), Técnica de *Hill Climbing - HC*, Técnica de Perturbação e Observação (*P&O – Perturbation and Observation*), e Técnica de Controle por Histerese.

Para se obter a máxima eficiência em operação, é necessário esclarecer que há apenas um Ponto de Máxima Potência (*MPP – Maximum Power Point*), e este varia de acordo com as condições climáticas a que está submetido o painel fotovoltaico. Os painéis fotovoltaicos apresentam características tensão *versus* corrente não linear, que podem ser observadas, as quais variam de acordo com o nível de radiação solar e de temperatura e que tornam a extração desta máxima potência uma tarefa complexa, considerando-se as variações de carga.

O MPP de um painel solar fotovoltaico corresponde ao ponto da curva corrente *versus* tensão, em que se obtém a máxima potência gerada pelo painel. Na Figura 2.23 está representada a curva característica I-V, onde se verifica que para a máxima potência fornecida pelo painel existe apenas um valor de tensão (V_{mp}) e somente um valor de corrente (I_{mp}).

Figura 2.23 – Representação dos pontos de operação de um painel fotovoltaico.

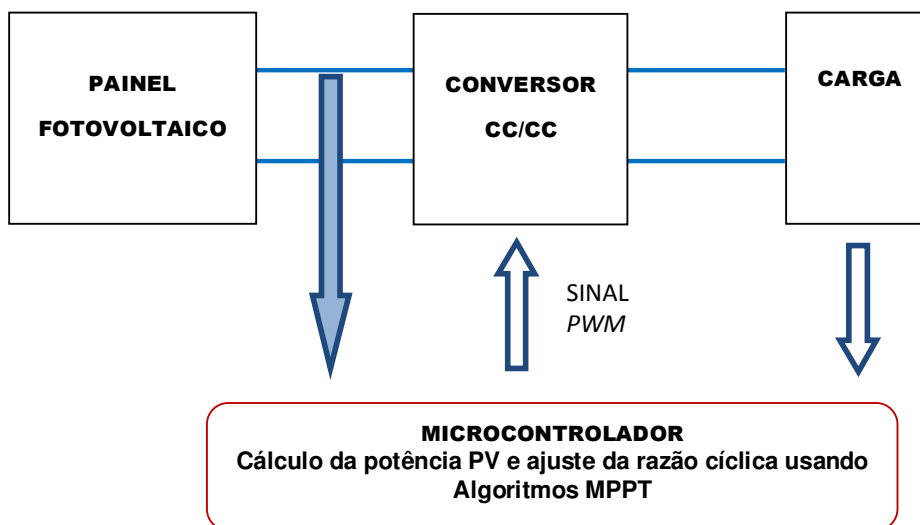


O painel solar fotovoltaico ideal deve funcionar sempre na sua potência nominal, mas isso não acontece porque as condições ambientais, temperatura e radiação solar, alteram seu ponto de funcionamento. A posição do sol, a poluição atmosférica, a alteração dos níveis de radiação, as variações da temperatura e o próprio envelhecimento do painel, são fatores que contribuem para que o painel não funcione sempre no seu ponto de máxima potência.

Como o ponto de máxima potência tem tendência a se deslocar, é necessário um sistema que seja capaz de detectar e acompanhar o deslocamento desse ponto, de forma a extrair sempre a máxima potência do painel – MPPT. Neste capítulo são apresentados os principais métodos de busca do ponto de máxima potência utilizados em sistemas fotovoltaicos e as suas diversas aplicações.

Os conversores são circuitos eletrônicos que convertem uma tensão CC para diferentes níveis de tensão CC fornecendo sempre uma saída regulada. Os conversores utilizados são classificados como conversores CC-CC de modo chaveado, também chamados de fontes chaveadas ou chaveadores [34]. O MPPT consiste num conversor CC/CC que, de acordo com as condições impostas pelo painel fotovoltaico, ajusta a tensão de saída do módulo de modo que o funcionamento ocorra no ponto correspondente à máxima potência. Desta forma, o MPPT, através do seu algoritmo de controle, altera o valor do ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do conversor, operando assim em conjunto, com o objetivo de encontrar e manter o painel operando no ponto de máxima potência. A Figura 2.24 mostra o diagrama de blocos simplificado de um circuito MPPT.

Figura 2.24 – Diagrama de blocos simplificado do MPPT.



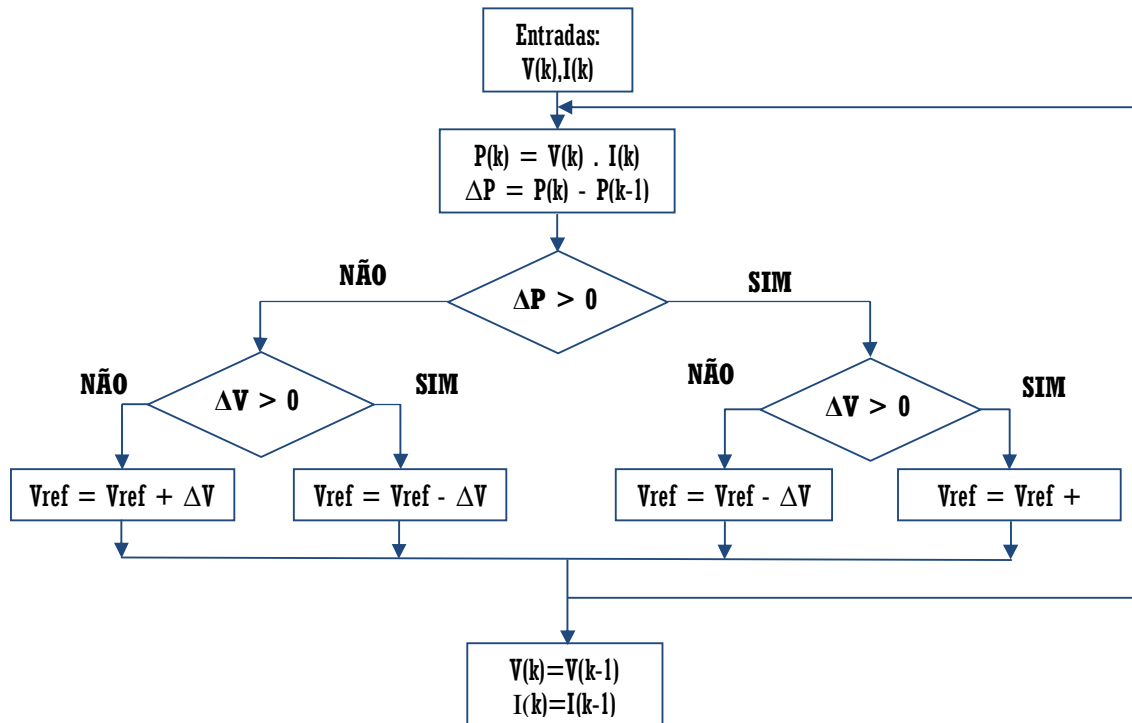
Para superar este problema, vários métodos para extração da máxima potência têm sido propostos na literatura [16-23], e, uma análise comparativa cuidadosa destes métodos pode resultar em informações importantes para o projeto destes sistemas [24].

As técnicas de rastreamento dos algoritmos de busca do ponto de máxima potência apresentam suas respectivas vantagens e desvantagens. Estes métodos variam essencialmente em complexidade de implementação e análise, velocidade de convergência, sensores requeridos, custo, eficiência e implementação em hardware.

2.6.1 Método da Perturbação e Observação (P&O)

Este método opera periodicamente incrementando ou decrementando a tensão de saída terminal do PV e comparando a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Caso a tensão varie e a potência aumente, o sistema de controle muda o ponto de operação naquela direção; caso contrário, muda o ponto de operação na direção oposta. Uma vez que o sentido para a variação da corrente é conhecido, a corrente é variada a uma taxa constante. Esta taxa é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a menor oscilação em regime permanente. O fluxograma básico do método é apresentado na Figura 2.25. Este método necessita dos sensores de corrente e de tensão. Observa-se que o método P&O pode ser melhorado através da variação do passo de incremento da razão cíclica do conversor, de forma a otimizar a busca do MPP. Quando o passo é variável o método é denominado de P&O modificado.

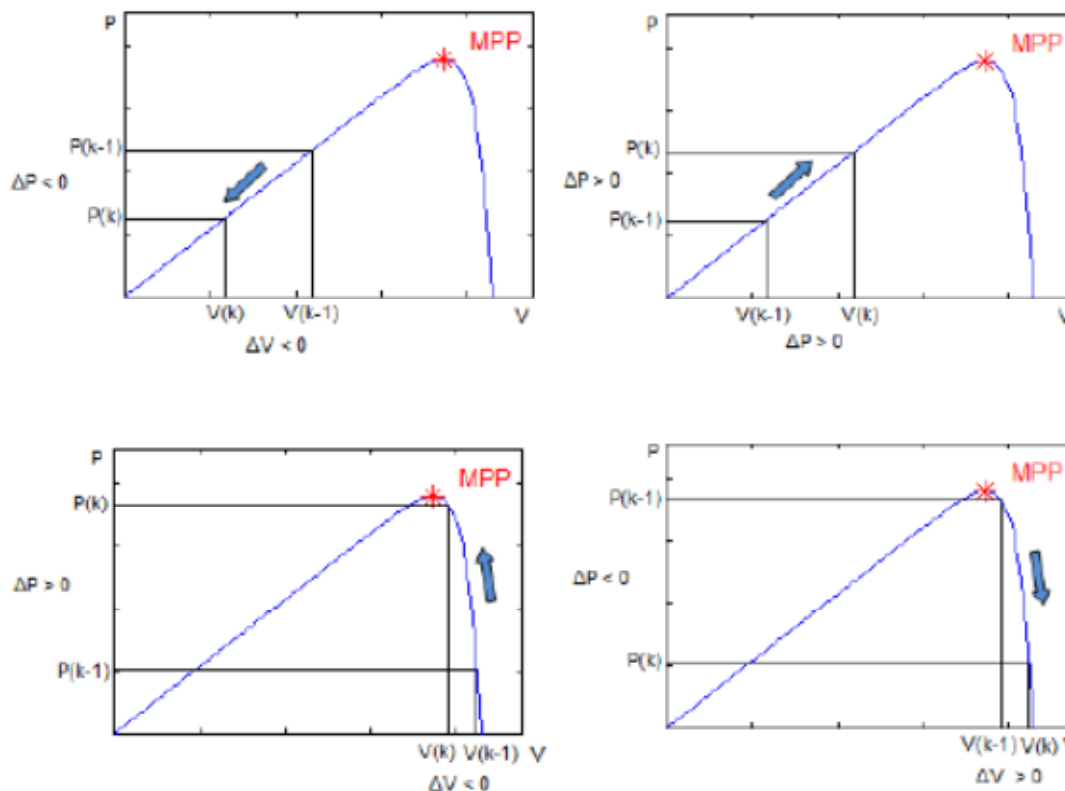
Figura 2.25 – Fluxograma do Algoritmo do Método Perturbação & Observação.



O Método da Perturbação e Observação, normalmente conhecido como Perturba e Observa, é talvez a técnica mais utilizada para encontrar o ponto de máxima potência devido à sua fácil implementação [29].

O funcionamento do fluxograma do algoritmo Perturbação & Observação pode ser explicado da seguinte forma: numa primeira fase são lidos os valores da corrente e da tensão para calcular a potência gerada pelo painel fotovoltaico. Após esse cálculo verifica-se se a potência aumentou ou diminuiu através de $\Delta P = P(k) - P(k-1)$. Em função deste resultado e dos possíveis comportamentos para a potência, demonstrados na Figura 2.26, altera-se a tensão de referência de forma a ir de encontro ao ponto de máxima potência. Na fase final são guardados os valores da tensão e corrente, para servirem de comparação na operação seguinte.

Figura 2.26 – Evoluções possíveis da potência num painel fotovoltaico.



Este método baseia-se na alteração da variável de referência e na comparação da potência disponibilizada pelo painel ou conjunto de painéis fotovoltaicos antes e depois desta alteração, definindo assim o sentido da próxima perturbação. Ou seja, será introduzida uma perturbação, numa determinada direção, na corrente ou na tensão do arranjo de painéis fotovoltaicos que provocará alterações no valor da potência de saída do módulo. Se a potência de saída aumentar, a próxima perturbação continua na mesma direção, mas se pelo contrário, a perturbação diminuir, o sistema será perturbado na direção contrária na iteração seguinte.

A Tabela 5 mostra um resumo do comportamento da potência em função da perturbação [27].

Tabela 5 – Resumo do Algoritmo Perturbação e Observação.

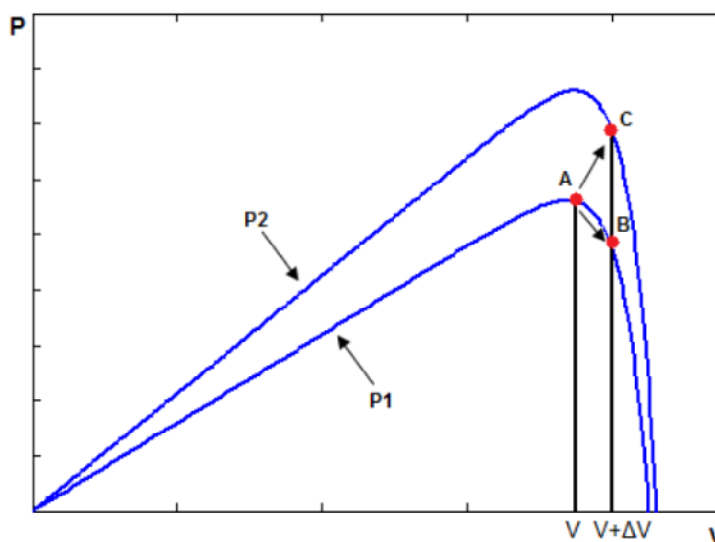
Perturbação Atual	Alteração de Potência	Perturbação Seguinte
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Este processo é repetido periodicamente. Na Figura 2.26 estão representados os quatro casos possíveis de como a potência de um arranjo de painéis fotovoltaicos pode evoluir para uma determinada condição climática [26].

Pela descrição anterior e pela observação na Figura 2.27 percebe-se que, através desta técnica o painel fotovoltaico nunca irá atingir o ponto de máxima potência, uma vez que, a tensão do painel será perturbada constantemente. Isto faz com que, em regime permanente, a potência oscile em torno do MPP desperdiçando um pouco de energia. No entanto, esta oscilação pode ser diminuída através da redução do tamanho da perturbação, porém perturbações muito baixas tornam a técnica lenta, demorando mais tempo para encontrar o ponto de máxima potência.

Os métodos apresentados neste capítulo apresentam vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação a ser feita. O Método Perturba e Observa também apresenta desvantagens, como se revela falível em situações onde podem ocorrer mudanças bruscas das condições climáticas. A partir do ponto A, se as condições atmosféricas permanecerem aproximadamente constantes, é aplicada uma perturbação ΔV na tensão do painel, deslocando o ponto de operação para B. Como após a inserção da perturbação a potência diminuiu, o sentido de ΔV tem de ser invertido. No entanto, se ocorrer um aumento repentino da radiação solar desloca a potência de P1 para P2 e o ponto de operação passará de A para C. Isto representa um aumento da potência e a perturbação é mantida no mesmo sentido. Como consequência, o ponto de operação irá divergir do ponto de máxima potência e manterá essas divergências se a radiação continuar aumentando [27].

Figura 2.27 – Mudança repentina do ponto de operação devido às alterações climáticas.



Como conclusão da escolha do método de busca do Ponto de Máxima Potência - MPPT, de acordo com [25] a inclusão de um sistema de procura do ponto de máxima potência num sistema fotovoltaico aumenta a produção de energia elétrica em cerca de 20% a 40%, quando comparado com um sistema sem MPPT.

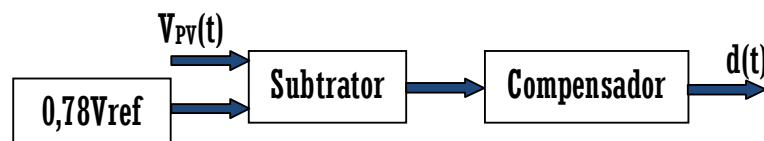
2.6.2 Método da Razão Cíclica Fixa

A razão cíclica fixa representa o mais simples dentre os métodos por não necessitar de nenhuma realimentação, onde a resistência aparente da carga é ajustada uma única vez para a potência máxima do painel e não é ajustada novamente, ou seja, este é um método *off-line*.

2.6.3 Método da Tensão Constante

O método da tensão constante – CV (*Constant Voltage*) utiliza resultados empíricos, indicando que a tensão no MPP (V_{MPP}) é da ordem de 70% a 80% da tensão em circuito aberto (V_{OC}) do painel fotovoltaico para a condição atmosférica padrão. Entre os diversos pontos de MPP (variando-se as condições atmosféricas), a tensão nos terminais do módulo varia muito pouco, mesmo quando a intensidade da irradiação solar se altera. Assim, assegurando-se que a tensão no módulo permaneça constante é possível operar próximo do MPP. Isto é realizado com uma malha fechada em tensão conforme diagrama da Figura 2.28. Este método necessita apenas de um sensor de tensão (V_{PV}).

Figura 2.28 – Modelo do método da Tensão Constante.



O método da tensão constante é uma das técnicas mais simples para a busca do ponto de máxima potência. O princípio de funcionamento desta técnica baseia-se no fato de a tensão de máxima potência (V_{mp}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) terem uma relação linear independente da radiação solar ou temperatura, como mostrado na Equação 7.

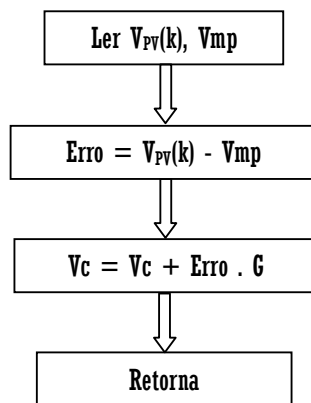
$$V_{mp} = k_1 \cdot V_{oc} \quad (7)$$

Nesta equação k_1 é o fator de tensão e depende das características do módulo fotovoltaico utilizado. O cálculo do valor de k_1 é um processo difícil, por isso, geralmente é determinado por meios empíricos. O seu valor é sempre menor que 1 e varia entre 0,73 e 0,8 sendo que, k_1 normalmente é igual a 0,76. Assim, medindo a tensão de circuito aberto e uma

vez terminado o valor do fator de tensão pode calcular-se o valor de V_{mp} , Equação 7, para colocar o módulo no ponto de máxima potência [26].

O valor de V_{mp} é utilizado como referência para ser comparado com a medição da tensão do painel (V_{pv}) e gerar um sinal de erro que é utilizado para ajustar a tensão de controle (V_c), como se pode ver no fluxograma da Figura 2.29.

Figura 2.29 – Fluxograma do método de Tensão Constante.



Um dos problemas desta técnica é o fato da tensão de circuito aberto do módulo variar com a temperatura, obrigando a efetuar medições constantes desta, já que o aumento da temperatura altera o valor da tensão de circuito aberto. Outra desvantagem, que está inerente às medições, é a obrigatoriedade de desligar os painéis fotovoltaicos do conversor de potência para que se possam efetuar as medições de V_{oc} , o que resulta numa perda momentânea de energia e consequentemente de eficiência. Por isso, faz-se necessário a utilização de interruptores adicionais para desligar os painéis fotovoltaicos do conversor. Mas a principal desvantagem desta técnica é a presença de erro em regime permanente, uma vez que a relação entre V_{oc} e V_{max} não é constante. Desta forma, o arranjo fotovoltaico nunca opera sobre o ponto de máxima potência, mas sim em torno deste.

Neste método existem três parâmetros a serem considerados: o período de amostragem da tensão de circuito aberto, que representa o tempo em que os painéis fotovoltaicos são desligados do conversor de potência; período de amostragem, ou seja, o intervalo de tempo em que a tensão do painel é amostrada em funcionamento normal; e o ganho G desta técnica. Se o período de amostragem da tensão de circuito aberto for muito grande, o ponto de máxima potência não pode ser seguido de forma muito precisa. Os valores do período de amostragem e do ganho G estão relacionados com a velocidade de convergência e estabilidade da técnica. A diminuição do período de amostragem permite aumentar a velocidade de convergência, embora aumente a ondulação de potência em regime

permanente, podendo levar à instabilidade da técnica para valores muito pequenos. O aumento do valor do ganho G aumenta a velocidade de convergência e acrescenta, também, ondulação em regime permanente da potência de saída do painel, chegando a ficar instável para valores muito elevados [26].

2.6.4 Método da Corrente Constante

O método da corrente constante, também conhecido como método da corrente de curto-circuito, tem um princípio de funcionamento idêntico ao método da tensão constante.

A corrente de curto-circuito (I_{sc}), dependente da variação das condições atmosféricas, altera o valor da corrente de máxima potência (I_{mp}), uma vez que, segundo este método, I_{mp} e I_{sc} estão linearmente relacionados, como mostra a Equação 8 [27].

$$I_{mp} = k_2 \cdot I_{sc} \quad (8)$$

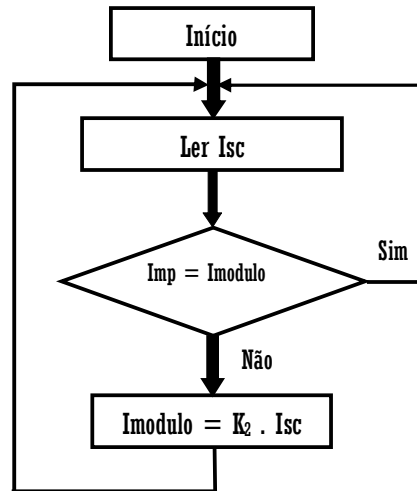
A constante de proporcionalidade, k_2 , é determinada por meios empíricos de acordo com o painel fotovoltaico, sendo o seu valor muito próximo de um, mas sempre menor que este.

Desta forma, medindo o valor da corrente de máxima potência e uma vez determinado o valor de k_2 pode se calcular o valor de I_{mp} para colocar o painel para funcionar no ponto de máxima potência.

A medição de I_{sc} durante o período de funcionamento do módulo fotovoltaico é uma operação difícil. A solução é utilizar um interruptor no conversor de potência, para que a corrente de curto-circuito possa ser medida periodicamente. Isto aumenta o número de componentes do sistema e, consequentemente, o custo. Através deste método, além de haver uma redução da potência de saída, o valor da corrente para o ponto de máxima potência nunca é atingido, tal como mostra a Equação 8.

Na Figura 2.30 está representado o fluxograma deste método de procura do ponto de máxima potência.

Figura 2.30 – Fluxograma do Método Corrente Constante.



2.6.5 Método da Condutância Incremental

O Método da Condutância Incremental (IncCond) é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no MPP ($dP/dV=0$), positiva à esquerda e negativa à direita. Este método busca o MPP da mesma forma que o Método Perturbação e Observação - P&O, estudado no tópico 2.6.1, e, também apresenta a versão modificada.

A técnica da condutância incremental utiliza a curva potência *versus* tensão do painel ou do arranjo de painéis fotovoltaicos, para encontrar o ponto de máxima potência dos mesmos. Esta técnica baseia-se nos valores da condutância instantânea e incremental do painel que são obtidos através das medições da corrente e tensão do painel. O ponto de máxima potência extraída pelos painéis é atingido quando a derivada da potência de saída do painel, em relação à tensão, for zero como demonstra a Equação 9 e a Figura 2.31 [25].

$$\frac{dP}{dV} = 1 + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad (9)$$

Igualando a derivada da potência, em relação à tensão, a zero, tem-se a Equação 10:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \leftrightarrow 1 + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (10)$$

Se o ponto de operação está à direita da curva de potência, então se tem em a Equação 11:

$$\frac{dP}{dV} < 0 \leftrightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (11)$$

Se o ponto de operação está à esquerda da curva de potência, então se tem a Equação 12:

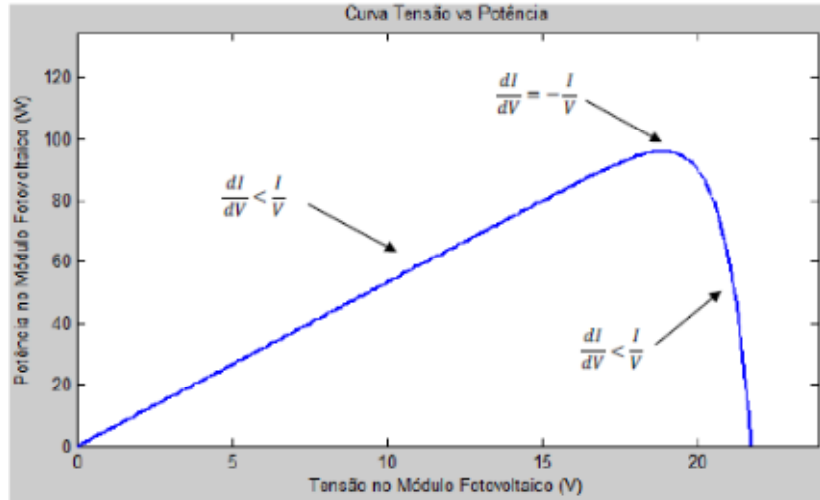
$$\frac{dP}{dV} > 0 \leftrightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (12)$$

Este método vai procurar o ponto de tensão, onde a condutância instantânea é igual à condutância incremental, ou seja, a Equação 13 é:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (13)$$

As três situações anteriormente descritas podem ser vistas na Figura 2.33.

Figura 2.31 – Gráfico da curva Tensão x Potência para o Método Condutância Incremental.



Na Figura 2.32 observa-se o fluxograma do método da técnica Condutância Incremental. Em primeiro lugar são lidos os valores atuais da tensão $V(k)$ e corrente $I(k)$ do painel fotovoltaico. Em seguida são calculados valores da diferença de tensão (dV) e corrente (dI) relativamente às medições anteriores. A principal operação deste algoritmo é a comparação dos valores de $\frac{dI}{dV}$ e $-\frac{I}{V}$.

Segundo a Equação (7), no ponto de máxima potência $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$, por isso não é realizada qualquer ação e os valores de $V(k-1)$ e $I(k-1)$ são atualizados, e o algoritmo retorna ao início. Quando $\frac{dI}{dV} \neq -\frac{I}{V}$ a tensão de referência, V_{ref} , é ajustada no sentido de modificar a tensão do painel fotovoltaico até à tensão de máxima potência, de acordo com o sinal de $\frac{dP}{dV}$.

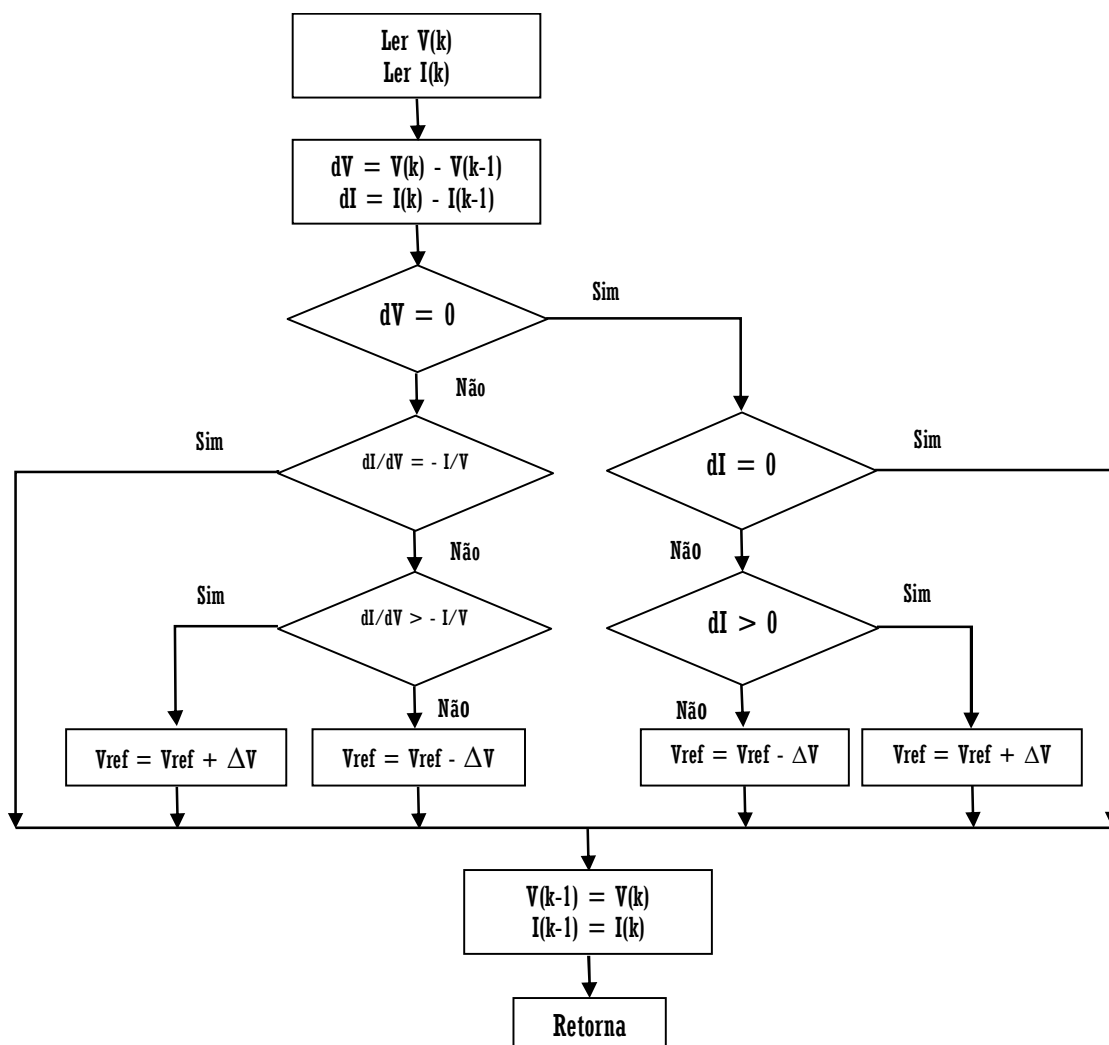
Se o sistema operar no MPP ($dV=0$), as alterações climáticas são detectadas através de $dI \neq 0$ e a tensão de referência V_{ref} será ajustada dependendo do sinal de dI .

Pode-se afirmar que o método da condutância incremental apresenta vantagens, desde que sua capacidade atinja exatamente o ponto de máxima potência, em vez de oscilar em torno deste. Além disso, consegue atingir o MPP, em condições climáticas instáveis, com uma precisão e rapidez muito superior aos outros métodos. No entanto, tem a desvantagem de ser uma técnica com um grau de complexidade elevado, quando comparado com as outras técnicas.

Por sua vez, o método da condutância incremental, oferece também uma elevada eficiência, quando comparado com o método da perturbação e observação, todavia trata-se de

uma técnica bem mais complexa que obriga a uma dificuldade acrescida na fase da implementação. Porém estas complexidades traduzem-se num algoritmo mais preciso, altamente eficiente e capaz de operar exatamente no ponto de máxima potência. Este método funciona de forma muito sólida quando ocorrem mudanças rápidas nas condições climáticas, já que ajusta rapidamente a tensão do módulo fotovoltaico para encontrar, praticamente sem oscilações, o novo MPP [25]. Como desvantagem, para além do seu elevado grau de complexidade, esta é uma técnica mais cara, exigindo um microcontrolador com mais recursos, e requer sensores de tensão e corrente.

Figura 2.32 – Fluxograma do Método Condutância Incremental.

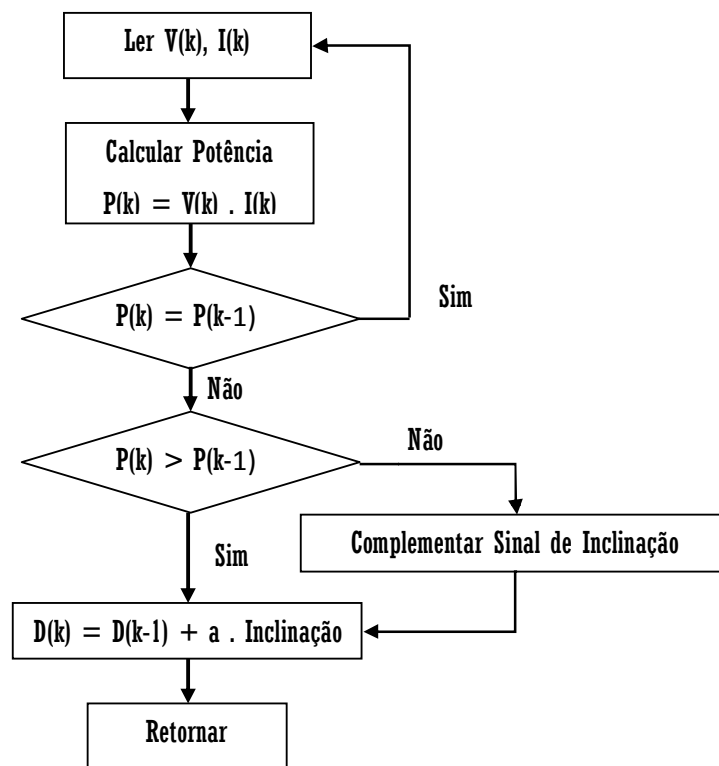


2.6.6 Método *Hill Climbing* (HC)

O Método *Hill Climbing* é aplicado aos sistemas perturbando o índice de modulação, em intervalos regulares [28], medindo a corrente e tensão atuais do painel e, em função dos resultados anteriores, decide em que zona da curva de potência se encontra. Uma vez conhecido a potência, o controle altera o índice de modulação, de forma a levar o painel para o ponto de máxima potência. Este método não necessita de conhecer os parâmetros do painel aos quais vão ser aplicados.

O algoritmo utilizado neste método, Figura 2.33, possui os mesmos problemas que são apresentados pela técnica P&O, descrita no tópico 2.6.1, quando submetido a rápidas variações de radiação solar. No entanto, o erro em regime permanente do HC é bastante superior.

Figura 2.33 – Algoritmo do MPPT do Método *Hill Climbing*.



Primeiramente, o algoritmo, mede a corrente e a tensão e calcula a potência associada ao painel fotovoltaico. Em seguida verifica se a potência do painel mantém o mesmo valor da iteração anterior. Caso verifique que não houve alteração, mantém o índice de modulação, e termina essa iteração. Na etapa seguinte, e em função do que aconteceu com o valor da potência calculada, verifica, pela diferença de tensão da iteração anterior e da mais

recente, em que zona da curva de potência se encontra. Finalmente, tendo esse conhecimento, aumenta ou diminui o índice de modulação de forma a fazer tender o estado do painel para o ponto de máxima potência.

A Tabela 6 apresenta um resumo da comparação de quatro métodos analisados, conforme [25].

Tabela 6 – Comparação entre os métodos MPPT.

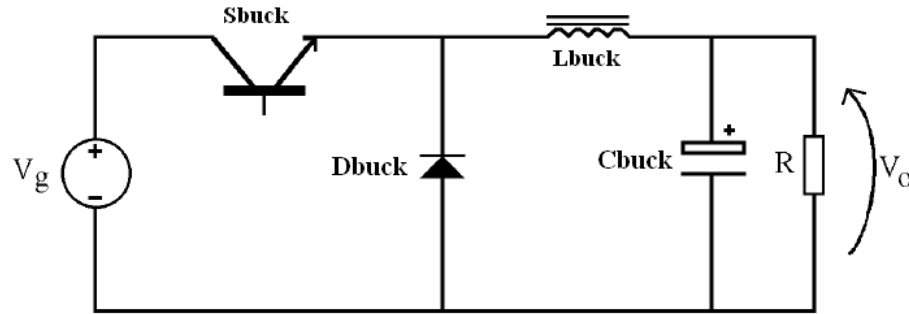
	Tensão Constante	Corrente Constante	Indutância Incremental	Perturbação e Observação
Eficiência	Baixa (90%)	Baixa (90%)	Alta (98%) depende de como o método é otimizado	Média (95%) depende de como o método é otimizado
Complexidade / Implementação	Muito simples, mas muito difícil encontrar o valor ideal de k_1	Muito simples, mas muito difícil encontrar o valor ideal de k_2	Mais complexo. Necessita de microcontrolador com mais recursos	Fácil de implementar. Mas pode se tornar complexo se condições variarem bruscamente
Custo	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo
Reações às mudanças atmosféricas	Resposta não tão rápida quanto a proporcionalidade entre V_{mp} e V_{oc}	Resposta não tão rápida quanto a proporcionalidade entre I_{mp} e I_{sc}	Boa, ajusta-se automaticamente e sem oscilações	Resposta lenta. Pode ter comportamentos não corretos em torno do MPP
Outras limitações	Não encontra o MPP quando as células estão danificadas ou quando módulos estão sombreados	Não encontra o MPP quando as células estão danificadas ou quando módulos estão sombreados	Necessita de sensores de tensão e corrente	Não encontra exatamente o MPP, oscila em torno deste

Tendo em consideração todas as vantagens e desvantagens acima referidas, para este trabalho optou-se por implementar o algoritmo da Perturbação e Observação (P&O), pelo fato de ser uma técnica que satisfaz de forma aceitável as exigências do projeto. A escolha foi efetuada com base na análise teórica de cada um dos algoritmos, sem qualquer base de suporte em resultados provenientes de simulações. O único método simulado e implementado foi o de Perturbação e Observação (P&O).

2.7 Conversor Buck

Na Figura 2.34 mostra-se o diagrama elétrico do conversor *buck* [2]. Este circuito é chamado conversor *buck* ou conversor abaixador por que a tensão na saída é menor que a da entrada [34]. É caracterizado por ter entrada em tensão e saída em corrente.

Figura 2.34 – Conversor *buck* [34].



As etapas de funcionamento do conversor *buck* são descritas a seguir.

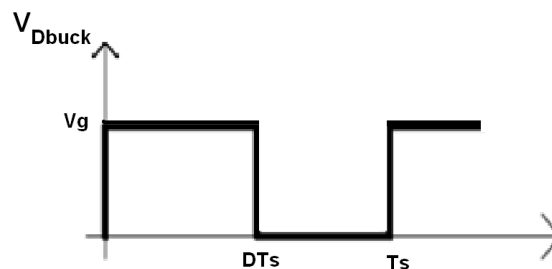
1ª Etapa (0, DT_s): S_{buck} está conduzindo. A corrente circula por L_{buck} e pela saída. Nesta etapa V_g fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_{buck} .

2ª Etapa (DT_s , $(1-D)T_s$): S_{buck} está bloqueado. No instante de abertura de S_{buck} o diodo D_{buck} entra em condução. A energia do indutor é transferida para a carga, isto é, o indutor é desmagnetizado.

A forma de onda da tensão V_{Dbuck} mostrada na Figura 2.35, é dada pela Equação 14:

$$V_{Dbuck} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_g dt \quad (14)$$

Figura 2.35 – Tensão V_{Dbuck} no conversor *buck* [34].



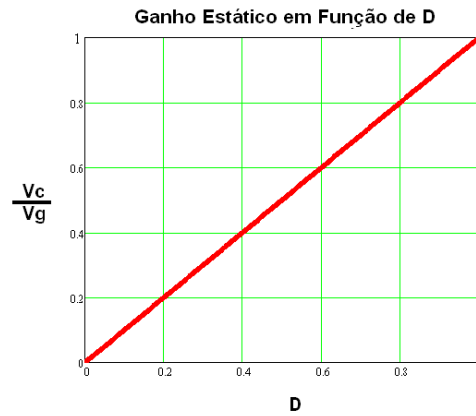
A Figura 2.35 mostra um filtro passa baixas LC ($L_{buck}C_{buck}$) adicionado ao conversor básico. O diodo (D_{buck}) proporciona um caminho para a corrente no indutor quando a chave (S_{buck}) é aberta e é polarizada reversamente quando a chave é fechada.

A tensão média sobre o indutor ($V_{L_{buck}}$) é zero [34], então V_c é dado pela Equação 15.

$$V_C = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_g dt = \frac{1}{T_s} \cdot V_g (D \cdot T_s - 0) = \frac{1}{T_s} V_g \cdot D \cdot T_s = V_g \cdot D \text{ logo, } D = \frac{V_C}{V_g} \quad (15)$$

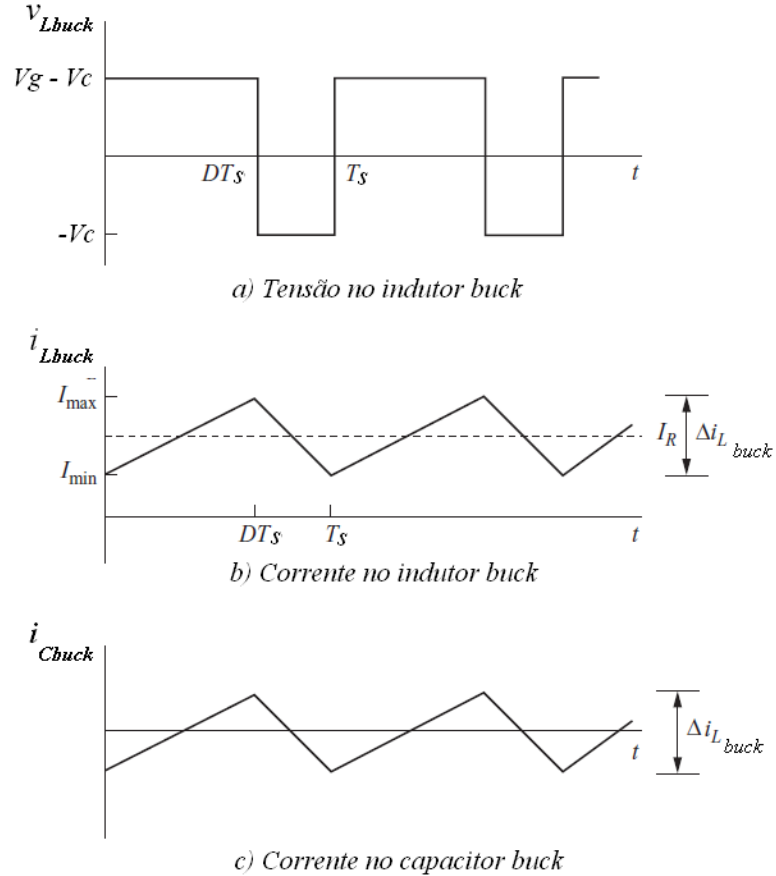
Na Figura 2.36 é mostrada a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor *buck*.

Figura 2.36 – Ganho estático em função da razão cíclica [2].



As principais formas de onda do conversor *buck* são mostradas na Figura 2.37.

Figura 2.37 – Principais formas de onda do conversor *buck* [34].



O conversor *buck* pode funcionar em três modos de operação:

- 1º - Condução Contínua:** a corrente em L_{buck} não se anula durante um período de comutação;
- 2º - Condução Descontínua:** a corrente em L_{buck} se anula a cada período de comutação;
- 3º - Condução Crítica:** a corrente em L_{buck} está no limiar de se anular a cada período de comutação.

As principais características do conversor *buck* são:

- ✓ Pode apenas diminuir a tensão na saída;
- ✓ A corrente de saída tem boa qualidade;
- ✓ A corrente na entrada é descontínua.

2.7.1 Topologia do Conversor Abaixador

Na Figura 2.34 tem-se o circuito básico de um conversor CC-CC tipo *Buck* (abaixador de tensão). O interruptor S_{buck} , mostrado funciona como um transistor bipolar, pode ser implementado com diversas tecnologias de dispositivos semicondutores, tais como MOSFETs ou IGBTs. A fonte de tensão V_g representa a tensão CC de entrada, sendo a resistência R a carga do conversor.

De acordo com o modelamento proposto por Vorpérian [63,64], considera-se que em um conversor CC-CC há uma “chave PWM” formada por um interruptor “ativo” e outro “passivo”. Nesse caso, o interruptor “ativo” é o transistor S_{buck} , e o interruptor “passivo” é o diodo D_{buck} . Como o conversor tipo *buck* é um conversor abaixador de tensão, a razão-cíclica e trabalho do transistor S_{buck} é calculada dividindo-se a tensão de entrada pela tensão de saída, conforme Equação 15.

2.8 Conclusão

A topologia do conversor elevador tem como vantagens a simplicidade do controle por apresentar uma única chave e elevado rendimento e confiabilidade. Como desvantagens, pode-se citar: não consegue evitar os crescimentos abruptos de corrente na entrada e não efetua proteção contra curto-circuito na carga.

CAPÍTULO 3

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.

3.1 Introdução

Para dar início ao dimensionamento deve-se conhecer a potência a ser consumida pelo sistema. Basicamente, o painel fotovoltaico, otimizado pelo circuito de controle, carrega os ultracapacitores durante o dia. À noite, os ultracapacitores fornecem energia, previamente armazenada, para o transceptor e a antena.

O consumo diário do sistema é calculado para 24h sendo necessário dividi-lo pela quantidade de horas do dia. No entanto, o sistema opera, por pelo menos, três horas por dia, desta forma, o consumo diário referente às três horas diárias, considerando a eficiência estimada do conversor elevador em 90%, a perda de energia devido à resistência no cabo coaxial que alimenta o sistema irradiante, as perdas nos conectores que acoplam os sinais de radiofrequência e as perdas de energia dos componentes eletrônicos, são apresentadas neste tópico.

3.1 Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico

O fabricante do equipamento transceptor informa no Manual Técnico a potência de consumo [58], devido a isto, optou-se por utilizar painéis fotovoltaicos que já se encontram instalados sobre o telhado do GPEC, cujas especificações atendem aos requisitos necessários para o bom funcionamento do sistema. Como o painel fotovoltaico utilizado foi o MM55 da Siemens, seu dimensionamento foi realizado de acordo com [5]. Os módulos fotovoltaicos da série MM são feitos de células solares de silício monocristalino e oferecem um elevado desempenho, durabilidade e confiabilidade para uma ampla gama de aplicações. Em particular, o tamanho compacto os torna adequados para utilização em sistemas fotovoltaicos isolados. O alumínio resistente, a camada de laminação de EVA (Etileno / Vinil / Acetato), oferece um alto grau de estabilidade e resistência a intempéries.

O fabricante do módulo fotovoltaico fornece a corrente máxima que equivale a corrente de curto circuito (I_{curto}), tensão máxima equivalente à tensão em circuito aberto (V_{aberto}), corrente nominal equivalente a corrente em MPP (I_{MPP}) e tensão nominal equivalente à tensão em MPP (V_{MPP}). Estes valores são fornecidos para uma radiação de 1.000 W/m^2 e

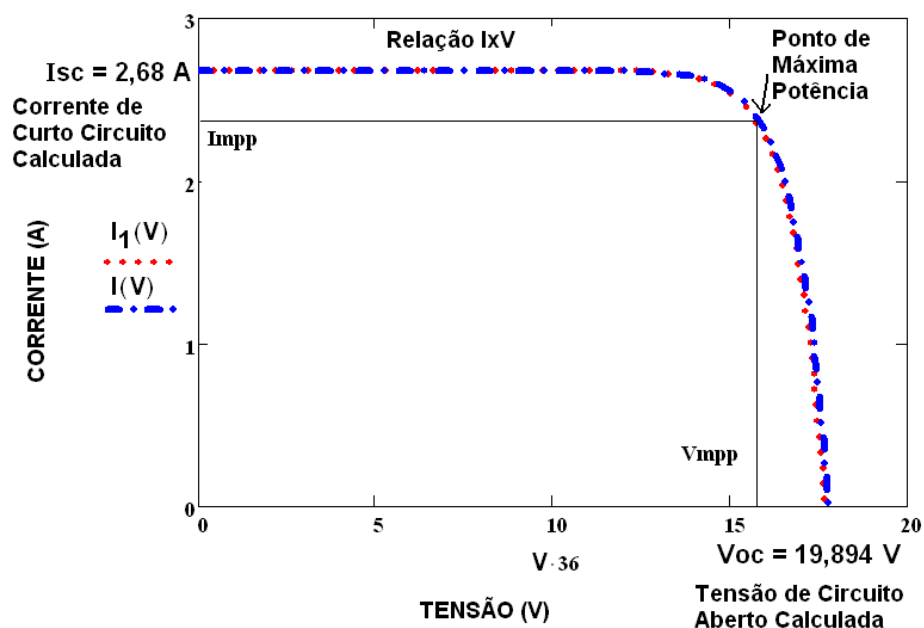
temperatura de 25°C. As especificações técnicas deste módulo fotovoltaico estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características elétricas do módulo M55 da Siemens.

Módulo M55 (Siemens)	
Potência máxima do painel (P_{max})	53 W
Máxima corrente (I_{curto})	3,35 A
Máxima tensão (V_{aberto})	21,7 V
Corrente nominal (I_{MPP})	3,05 A
Tensão nominal (V_{MPP})	17,4 V
Número de células	36

A característica Corrente *versus* Tensão (I-V) típica do painel solar SIEMENS modelo M55 com 36 células solares é plotada com o *Mathcad* 14 na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Representação dos pontos de operação do painel fotovoltaico M55 da Siemens.

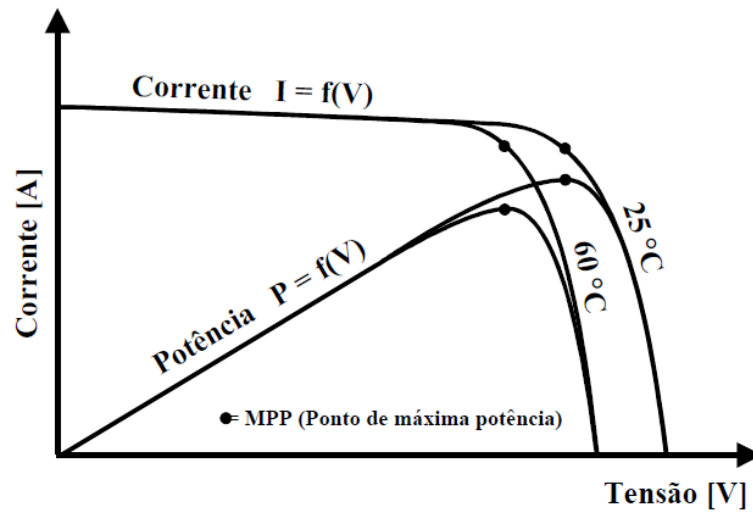


A curva característica mostrada na Figura 3.1, por exemplo, comprova que existe somente uma tensão e, conseqüentemente, uma corrente para a qual a potência máxima (P_{max}) pode ser extraída. Assim, o ponto de potência máxima representará o produto entre a tensão nominal (V_{MPP}) e a corrente nominal (I_{MPP}), dada pela Equação 16.

$$P_{max} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = 3,05 \cdot 17,4 = 53 \text{ W} \quad (16)$$

É necessário observar que o ponto de máxima potência (V_{MPP} , I_{MPP}) é influenciado tanto pela temperatura, mostrado na Figura 3.2, como pela intensidade de radiação luminosa.

Figura 3.2 – Curva de Potência e corrente em função da tensão no painel fotovoltaico [5].



Para um transceptor de 10 W nominal, a potência total consumida incluindo os cabos e conectores é de no máximo 25 W, 10 W do transceptor e mais 15 W de perdas nos cabos, conectores e sistema irradiante. Definindo o rendimento do conversor elevador em 90%, a radiação média de 5.500 Wh/m²/dia, a tensão do barramento dos ultracapacitores de 21,7 V e o tempo de funcionamento de 3 horas, a potência média fornecida pelo banco de capacitores é determinada usando a Equação 17.

$$P_{UCmed} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{25}{0,9} = 27,778 \text{ W} \quad (17)$$

Onde:

P_{UCmed} → Potência média fornecida pelo banco de ultracapacitores.

η → Rendimento do sistema, estimado em 90%.

P_{out} → Potência consumida pela carga.

O consumo do sistema em um dia (Ah/dia) é dado pela Equação 18.

$$A_{hl} = \frac{P_{UCmed} \cdot t_{func}}{V_{cc}} = \frac{27,77.3}{21} = 3,967 \text{ Ah/dia} \quad (18)$$

Onde:

A_{hl} → Consumo diário da carga.

t_{func} → Tempo de funcionamento da carga por dia (h/dia).

V_{cc} → Tensão do barramento (21 V).

A capacidade média de geração do módulo em um dia [5] é dada pela Equação 19.

$$A_{hd} = \frac{I_{RS} \cdot R_{med}}{R_s} = \frac{3,05 \cdot 5500}{1000} = 16,775 \text{ Ah/dia} \quad (19)$$

Onde:

$A_{hd} \rightarrow$ Capacidade média fornecida pelo módulo fotovoltaico em um dia.

$R_{med} \rightarrow$ Radiação média diária (em Fortaleza: 5.500 W/m² / dia).

$I_{RS} \rightarrow$ Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico

O número mínimo de painéis fotovoltaicos é dado pela Equação 20.

$$N_p = \frac{A_{hl} \cdot V_{cc}}{A_{hd} \cdot 12} = \frac{3,967.21}{16,775.12} = 0,414 \quad (20)$$

Onde:

$A_{hl} \rightarrow$ Capacidade de consumo diário da carga.

Obs.: Baseado em uma tensão de 12 V fornecida por painel, em 47°C.

De acordo com o cálculo apresentado, para suprir as necessidades do sistema proposto, é necessário apenas um módulo fotovoltaico MM55.

3.2 Dimensionamento do Elemento Armazenador

A determinação do ultracapacitor e a quantidade dependem da aplicação pretendida. Para o dimensionamento correto do sistema uma série de fatores deve ser conhecida. Esses fatores incluem a tensão de operação máxima e mínima, a corrente média ou potência, a corrente de pico ou de energia, a temperatura do ambiente operacional, o tempo de execução necessário para a aplicação e a vida útil do sistema. Agora, uma abordagem geral é descrita.

Cada um dos produtos tem uma tensão nominal (VR). Esses ultracapacitores são dispositivos de baixa tensão, esta tensão nominal é geralmente menor do que a tensão de aplicação requerida. Conhecendo-se a tensão de aplicação máxima (Vmax) que irá determinar quantas células de ultracapacitores necessitam de estar ligados em série. O número de células ligadas em série é determinado pela Equação 21.

$$C_{cells} = \frac{V_{max}}{V_R} = \frac{29,7}{2,7} = 11 \quad (21)$$

Em seguida, através do conhecimento da corrente média (I), em amperes, o tempo de execução desejado (dt), em segundos, e a tensão mínima de trabalho (Vmin), um sistema de capacitância aproximado pode ser calculado pela Equação 22.

$$C_{sys} = I \frac{dt}{dV} = I \frac{dt}{dV} = I \frac{dt}{(V_{max} - V_{min})} \quad (22)$$

A capacitância total do sistema é composta pela capacitância de todos os ultracapacitores ligados em série para atingir V_{max} . Para os ultracapacitores ligados em série, a capacitância das células individuais é determinada pela Equação 23.

$$\frac{1}{C_{sys}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (23)$$

Onde:

n = número de ultracapacitores em série ($C_{cells} = 11$)

C_{uc} = valor da capacitância de um ultracapacitor em F

Para $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C_{uc}$ e rearranjando a Equação 23, a célula de capacitância (C_{sys}), correspondente a capacitância do ultracapacitor equivalente, é determinada pela Equação 24.

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{sys}} &= \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} + \frac{1}{C_{uc}} \\ \frac{1}{C_{sys}} &= \frac{11}{C_{uc}}, \text{ onde, } C_{sys} = \frac{C_{uc}}{n} = \frac{350}{11} \rightarrow C_{sys} = 31,818 \text{ F} \end{aligned} \quad (24)$$

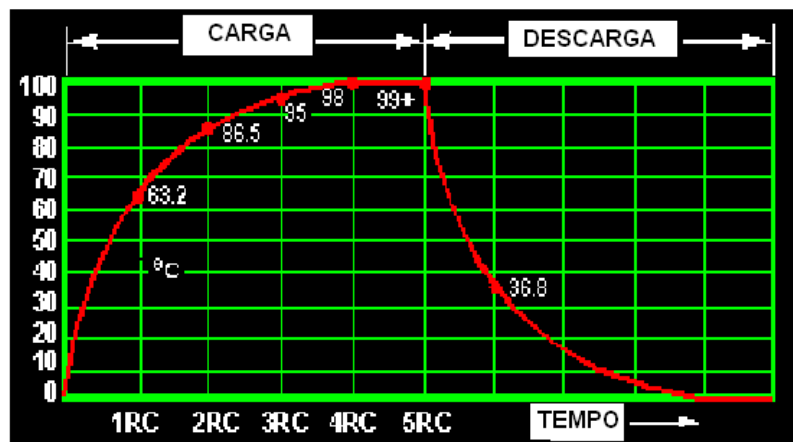
Este valor de capacitância pode então ser comparado com as folhas de dados do produto para determinar o ultracapacitor adequado para a aplicação. Se a capacitância calculada não é possível atingir através de um único ultracapacitor, será necessário colocar um ou mais ultracapacitores em série para se obter a tensão e energia necessárias.

Há muitos outros itens a considerar para o dimensionamento adequado da aplicação. Isto inclui a resistência interna do ultracapacitor, a queda de tensão instantânea associada a uma corrente aplicada, a temperatura ambiente de funcionamento que afeta a resistência interna do ultracapacitor e a sua durabilidade. Em [43] existem ferramentas adicionais, notas de aplicação e outros trabalhos que estão disponíveis para ajudar no processo de dimensionamento.

Ultracapacitores têm uma constante de tempo típica de cerca de um segundo. Uma constante de tempo reflete o tempo necessário para carregar um capacitor de 63,2% de carga ou descarga completa para 36,8% da carga total. Esta relação é ilustrada na Figura 3.3.

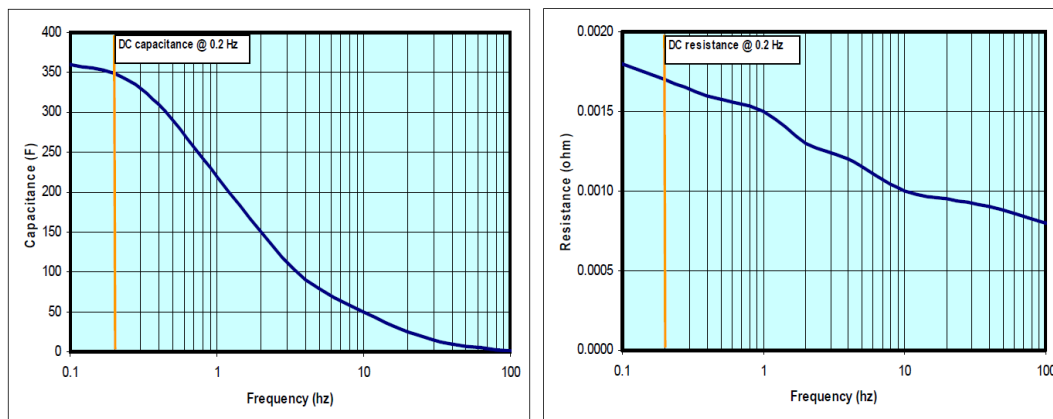
A constante de tempo de um ultracapacitor é muito mais elevada do que a de um capacitor eletrolítico. Portanto, não é possível expor ultracapacitores para uma ondulação de corrente contínua, pois pode resultar em sobreaquecimento. O ultracapacitor pode responder a exigências de energia de curto pulso, mas, devido à eficiência da constante de tempo a energia disponível é reduzida.

Figura 3.3 – Relação da constante de tempo RC [43].



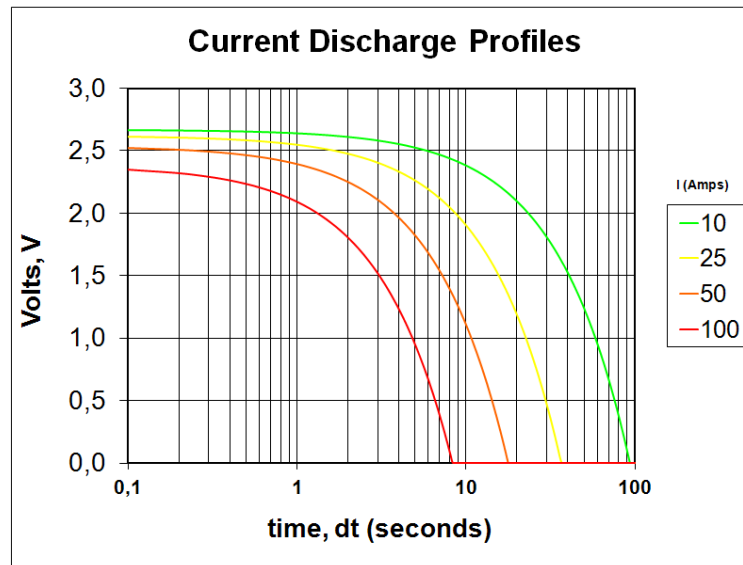
A Figura 3.4 ilustra o desempenho dos ultracapacitores em frequências diferentes. A queda na capacitância está associada com o tempo de resposta necessário para a carga nos íons dentro dos poros do eletrodo para o transporte entre positivo e negativo durante a carga e descarga. A queda na resistência é representativa para o tempo de resposta dos diferentes elementos resistivos dentro do ultracapacitor. Em baixa frequência todos os elementos resistivos estão presentes, em alta frequência apenas elementos de resposta rápidos, tais como as resistências de contato. O teste é tipicamente conduzido sem tensão aplicada. Por esta razão, a capacitância parece ser muito mais baixa do que aquilo que é afirmado na tensão nominal, como a capacitância que tem uma ligeira dependência da tensão.

Figura 3.4 – Resposta em frequência para capacitância e resistência com ultracapacitor



Na Figura 3.5 estão representados os perfis das curvas de correntes de descarga em função do tempo para quatro ultracapacitores com tensões variando de 2,3 a 2,7 V, 350 F e Resistência Série Equivalente (ESR) 0,0032 Ω para o modelo BCAP0356 da empresa americana *Maxwell Technologies* [43].

Figura 3.5 – Curvas de corrente de descarga no ultracapacitor [43].



Um ultracapacitor não armazena apenas carga, mas também energia. Ela não é dissipada, mas sim armazenada na forma de campo elétrico. A energia armazenada em um capacitor é expressa em Joules. Um Joule por segundo corresponde a um Watt.

A energia armazenada em um capacitor é igual ao trabalho feito para carregá-lo. Considere um capacitor com capacitância C , com uma carga $+q$ em uma placa e $-q$ na outra. Movendo um pequeno elemento de carga dq de uma placa para a outra contra a diferença de potencial $V = q/C$ necessita de um trabalho dW , conforme Equação 25:

$$dW = \frac{q}{C} dq \quad (25)$$

Pode-se descobrir a energia armazenada em um capacitor integrando essa equação. Começando com um capacitor descarregado ($q=0$) e movendo carga de uma placa para a outra até que as placas tenham carga $+Q$ e $-Q$, assim um trabalho W é dado pela Equação 26:

$$W_{\text{carregando}} = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = E_{\text{armazenada}} \quad (26)$$

Assim sendo a energia armazenada em um ultracapacitor é igual à energia fornecida a ele por uma fonte. Neste projeto utilizou-se a Equação 27 para o cálculo da energia armazenada.

$$E_{\text{arm}} = \frac{C_{uc} \cdot V^2}{2} = \frac{31,818.2.7^2}{2} = 115,977 \text{ J} \quad (27)$$

No SI (Sistema Internacional) 1 Farad (F) corresponde a 1 Coulomb (C) por Volt (V), $Farad = \frac{Coulomb}{Volt}$, 1 Watt corresponde a 1 Joule por segundo, $Watt = \frac{Joule}{segundo}$.

Convertendo o resultado obtido para Watt, tem-se para a energia armazenada no banco de ultracapacitores o valor de 115,977 W.

O sistema foi dimensionado para três dias de autonomia e uma profundidade máxima de descarga de 60%, utilizando-se o resultado da Equação 18, tem-se a Equação 28.

$$C_{ultra} = \frac{A_{hl} \cdot d}{D_c} = \frac{3,967.3}{0,6} = 19,83 \text{ Ah} \quad (28)$$

Onde:

$C_{ultra} \rightarrow$ Capacidade total dos ultracapacitores (Ah);

$d \rightarrow$ Dias de autonomia (3 dias);

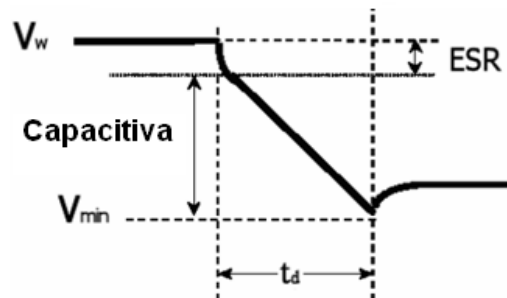
$D_c \rightarrow$ Máxima profundidade de descarga (60%).

Dessa forma o banco de ultracapacitores é composto por 11 unidades de 2,7 V 350 F em série, totalizando 29,7 V, mas por questões de segurança e proteção do sistema, limitou-se o controle da tensão em 21 V e capacitância equivalente total de 31,818 F.

A Figura 3.6 mostra, genericamente, o gráfico da curva de descarga no ultracapacitor.

Figura 3.6 – Perfil da curva de descarga no ultracapacitor [43].

Curva de Descarga do Ultracapacitor



Os onze ultracapacitores escolhidos para uso no projeto foram da VINA Technology fabricado na Coréia do Sul, modelo VEC2R7357, tem como características tensão de 2,7 V, peso 54,1 g; volume 57,7 ml; densidade de energia 6,1 Wh/L e possui 4 pinos.

Optou-se por esses componentes por não necessitar de se fazer manutenção periódica e por trabalhar com temperaturas que variam de -40°C a +65°C. Tendo como

aplicação a área de telecomunicações, devido à facilidade de importação e por ter um representante no Brasil. O atraso na entrega, normalmente, ocorre por ter que passar pela alfândega para o desembaraço aduaneiro na Receita Federal do Brasil bem como a liberação por parte da Polícia Federal e, conseqüentemente, o transporte pelos Correios até o endereço do destinatário. Isso ocorre, após o preenchimento de guias de importação, o que não foi o caso, pois os produtos foram destinados para pesquisa, e liberados para uso nesse projeto. Existe nos Correios o sistema importa fácil para pesquisadores cadastrados no CNPq.

Extraindo os valores da Tabela 8. O valor do resistor paralelo ao painel (R_1 no circuito simulador) R_{PM} é dado pela Equação 29.

$$R_{PM} = \frac{V_{aberto}}{I_{curto} - I_{MPP}} = \frac{21,7}{3,35 - 3,05} = 72,33 \, \Omega \quad (29)$$

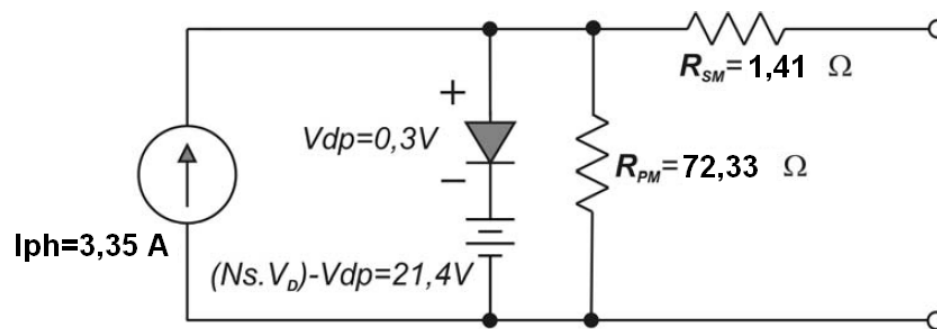
O valor do resistor série (R_2 no circuito simulador) R_{SM} é dado pela Equação 30.

$$R_{SM} = \frac{V_{aberto} - V_{MPP}}{I_{MPP}} = \frac{21,7 - 17,4}{3,05} = 1,41 \, \Omega \quad (30)$$

Na simulação com o *ORCAD CAPTURE 10.3* utilizou-se o circuito com o módulo fotovoltaico mostrado na Figura 3.7. A tensão V_{aberto} (21,7 V) é subtraída da tensão de polarização do diodo que tem uma queda de tensão direta típica de 0,3 V ($V_{dp} = 0,3$ V), desta forma o modelo não é influenciado por esta tensão de polarização.

Considerou-se a radiação de 1.000 W/m^2 e temperatura de 25°C .

Figura 3.7 – Circuito do *ORCAD CAPTURE 10.3* utilizado para simular o módulo fotovoltaico.



Na Figura 3.7, I_{ph} é a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico e N_p é a quantidade de painéis utilizados no projeto, $N_p = (N_s \cdot V_D) - V_{dp}$, nesse caso utilizou-se apenas uma unidade, N_s é a quantidade de células do painel, no caso 36. V_D é a tensão da célula do diodo de silício quando ela começa a conduzir, neste caso foi adotado, aproximadamente, 0,6 V.

3.3 Dimensionamento e Simulação do Conversor Boost

O painel fotovoltaico terá que fornecer no mínimo 12 V de tensão na entrada do conversor *boost* para que o transceptor funcione. Considerando que a radiação solar seja maior ou igual a 1000 W/m^2 . É possível montar a Tabela 8 com as especificações necessárias para o projeto do *boost*.

Tabela 8 – Especificações para o dimensionamento do conversor *boost*.

Especificações para o Dimensionamento do Conversor Boost	
Parâmetro	Valor
V_{PV_MIN} – Tensão mínima de entrada	12 V
V_{PV_NOM} – Tensão nominal do módulo fotovoltaico	17,4 V
V_{carga_max} – Tensão máxima na saída do conversor <i>boost</i> (tensão máxima nos ultracapacitores)	29,7 V
ΔV_{carga} – Variação de tensão no capacitor de saída do <i>boost</i>	0,05 % da tensão na saída
I_{PV_NOM} – Corrente nominal do módulo fotovoltaico	3,05 A
ΔI_{PV} – Ondulação de corrente na entrada do indutor do <i>boost</i>	11 % da corrente de entrada
f_{sboost} – Frequência da comutação no <i>boost</i>	21 kHz
ΔV_{PV} – Variação de tensão na entrada do <i>boost</i>	0,2 % da tensão de entrada

No pior caso, momento em que a tensão de entrada é mínima e que a tensão de saída é máxima, a razão cíclica do *boost* será máxima (D_{max}) [2]. Este valor da razão cíclica máxima é calculado na Equação 31.

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{PV\_MIN}}{V_{carga\_max}} = 1 - \frac{12}{29,7} = 0,596 \quad (31)$$

3.3.1 Dimensionamento do indutor boost

O valor do indutor utilizado no conversor *boost* é fornecido pela Equação 32 [2].

$$L_{boost} = 1 - \frac{V_{PV\_MIN}.D_{max}}{\Delta I_{PV}.f_{sboost}} = 1 - \frac{12.0,596}{0,11.3,05.21000} = 1,015 \text{ mH} \quad (32)$$

Como a corrente média que circula na fonte de entrada V_{PV} é a mesma que circula pelo indutor L_{boost} , a corrente eficaz que circula pelo enrolamento do indutor é encontrada usando a Equação 33 [2]. Assim, substituindo valores da Tabela 8, tem-se:

$$I_{L1ef} = \frac{P_{PV}}{V_{PV\_NOM}} = \frac{53}{17,4} = 3,05 \text{ A} \quad (33)$$

A corrente de pico através do indutor é dada pela Equação 34 [2], substituindo os valores na equação resulta:

$$I_{L1pico} = I_{L1ef} + \frac{\Delta I_{L1ef}}{2} = 3,05 + \frac{0,11.3,05}{2} = 3,22 \text{ A} \quad (34)$$

O produto das áreas do núcleo é dado pela Equação 35 [2].

$$Ae.Aw = \frac{L_{boost}.I_{L1pico}.I_{L1ef}.10^4}{K_W.J_{max}.B_{max}} = \frac{1,015.10^{-3}.3,22.3,05.10^4}{0,7.450.0,30} = 1,055 \text{ cm}^4 \quad (35)$$

Onde:

Ae	Área efetiva da perna central do núcleo
Aw	Área da janela do carretel (onde é situado o enrolamento)
$Ae.Aw$	Produto das áreas desejado [cm^4]
$K_W = 0,7$	Fator de utilização da área da janela (enrolamento)
$J_{max} = 450 \text{ A/cm}^2$	Densidade de corrente elétrica máxima
$B_{max} = 0,30 \text{ T}$	Densidade de fluxo magnético máximo

Baseado no cálculo do produto das áreas escolheu-se o núcleo de ferrite NEE-42/21/20 da *Thornton* para a confecção do indutor *boost* cujos dados estão na Tabela 9 [61].

Tabela 9 – Características do núcleo NEE-42/21/20 [61].

Características do núcleo de ferrite	
Ae.Aw – Produto das áreas	3,77 cm^4
Ae – Área efetiva da perna central	2,40 cm^2
Aw – Área da janela do carretel	1,57 cm^2
Ve – Volume do núcleo	23,30 cm^3

O número de espiras do indutor do *boost* é dado pela Equação 36 [62], substituindo os valores obtém-se:

$$N_{esp} = \frac{L_{boost}.I_{L1ef}}{Ae.B_{max}} = \frac{1,015.10^{-3}.3,05}{2,40.10^{-4}.0,30} = 43 \text{ espiras} \quad (36)$$

O entreferro total do indutor do conversor do *boost* é determinado pela Equação 37,

$$l_g = \frac{4.\pi.10^{-7}.N_{esp}^2.Ae.10^{-2}}{L_{boost}} = \frac{4.3,1415.10^{-7}.43^2.2,40.10^{-2}}{1,015.10^{-3}} = 0,055 \text{ cm} \quad (37)$$

Para o caso de núcleos de ferrite com formato EE, o valor do entreferro deve ser ajustado em $\frac{l_g}{2}$.

A profundidade de penetração da corrente no condutor é dada em pela Equação 38 [62] e substituindo valores obtém-se:

$$\delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_{sboost}}} = \frac{7,5}{\sqrt{21000}} = 0,05175 \text{ cm} \quad (38)$$

Para reduzir o efeito pelicular (*skin effect*) o diâmetro do condutor não poder ser maior que duas vezes o valor de δ . A bitola do condutor depende da densidade de corrente máxima. Portanto, o diâmetro do fio (Φ) escolhido deve ser menor que o valor calculado com a Equação 39.

$$\Phi = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,05175 = 0,10350 \text{ cm} \quad (39)$$

O diâmetro calculado corresponde ao fio 18AWG, que é muito rígido para dobrar, executar o enrolamento e ocupa uma área muito grande da janela do núcleo, por esse motivo, é adotado o fio 27AWG, que é mais flexível e se adapta melhor à área da janela do núcleo.

A área total do condutor depende da densidade de corrente máxima, é encontrada usando-se a Equação 40 [62] e substituindo valores obtém-se:

$$A_{fio} = \frac{I_{L1ef}}{J_{max}} = \frac{3,05}{450} = 0,00678 \text{ cm}^2 \quad (40)$$

O fio 27 AWG possui área de cobre sem isolamento de $0,001021 \text{ cm}^2$ e incluindo o isolamento $0,001244 \text{ cm}^2$.

A seguir é definida a quantidade de fios em paralelo usando a Equação 41.

$$N_{fios\_paralelos} = \frac{A_{fio}}{A_{fio\_27AWG}} = \frac{0,00678}{0,001021} = 6,64 \approx 7 \text{ fios paralelos} \quad (41)$$

O fator de utilização da janela do núcleo com o fio adotado é encontrado com a Equação 42.

$$T_{AWG27} = \frac{N_{esp} \cdot N_{fios\_paralelos} \cdot A_{fio\_isolamento}}{A_w} = \frac{43 \cdot 7 \cdot 0,001244}{1,57} = 0,238 \quad (42)$$

O valor calculado do fator de utilização da janela ou fator de enrolamento é menor que o valor adotado e está dentro do especificado em [62]. Portanto, o indutor é construído sem problemas.

A Tabela 10 apresenta as características físicas do indutor *boost*.

Tabela 10 – Características físicas do indutor *boost*.

Características físicas do indutor boost	
Núcleo de ferrite utilizado	IP12R – 42//21/20 da Thornton
Número de espiras	43
Fio utilizado	$7 \times 27 \text{ AWG}$
Entreferro	0,7 mm
Comprimento total do fio AWG27 utilizado	29,2 m
Densidade de fluxo utilizada	0,3 Tesla

3.3.2 Dimensionamento do capacitor $C1$

No cálculo do dimensionamento do *boost* é necessário a inclusão de um capacitor $C1$ na entrada do conversor, esse capacitor tem como função garantir que o painel sempre opere como fonte de tensão [13].

O valor do capacitor $C1$ utilizado na entrada do *boost*, paralelo com o painel fotovoltaico, é dado pela Equação 43 [2].

$$C1 = \frac{L_{boost} \cdot IPV_{NOM} \cdot \Delta IPV}{\Delta V \cdot VPV_{NOM}} = \frac{1,015 \cdot 10^{-3} \cdot 3,05 \cdot 0,11 \cdot 3,35}{17,4 \cdot (0,002 \cdot 17,4)} = 1.884 \mu F \quad (43)$$

No projeto foram dimensionados dois capacitores de 2200 $\mu F/35$ V em paralelo na saída do painel. Esta medida possibilitou diminuir a resistência série equivalente e dividiu a corrente que circulava por estes capacitores.

Para fins de montagem, foram utilizados dois capacitores de 680 $\mu F/25$ V e um de 220 $\mu F/25$ V.

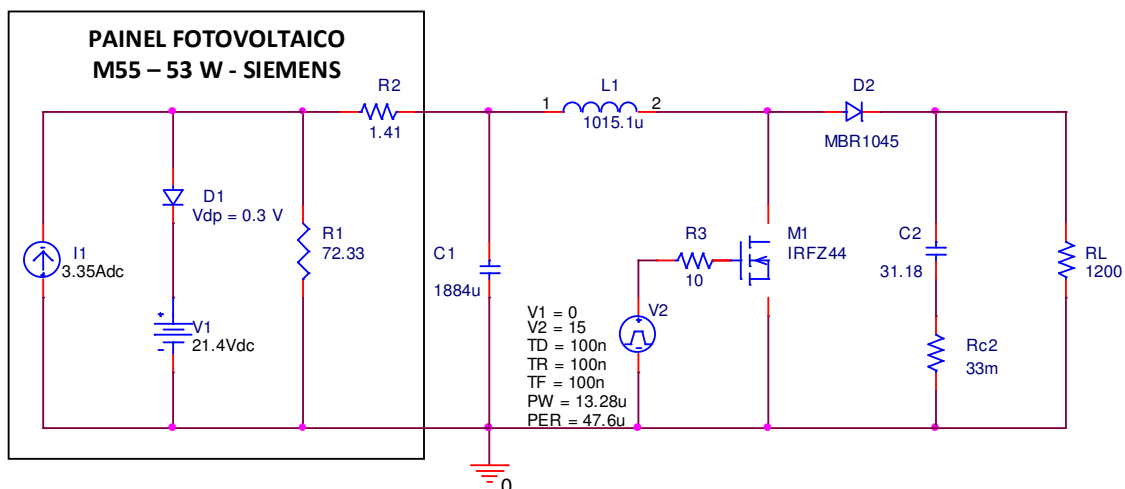
O regulador de tensão do *boost* foi o L7815CV da ST *Microelectronics*. Este componente possui uma baixa resistência de condução, 19 m Ω em 1 kHz.

O diodo (D_{boost}) do *boost* utilizado foi 1N5821 da ON *Semiconductor*, diodo *schottky* ultrarrápido que possui baixíssimo tempo de recuperação. A tensão de bloqueio deste diodo é de 30 V e capacidade de condução de 3 A.

O MOSFET utilizado como interruptor do *boost* foi o IRFZ48N da *International Rectifier*. Este componente possui uma baixa resistência de condução, o que possibilita a diminuição das perdas e uma comutação rápida.

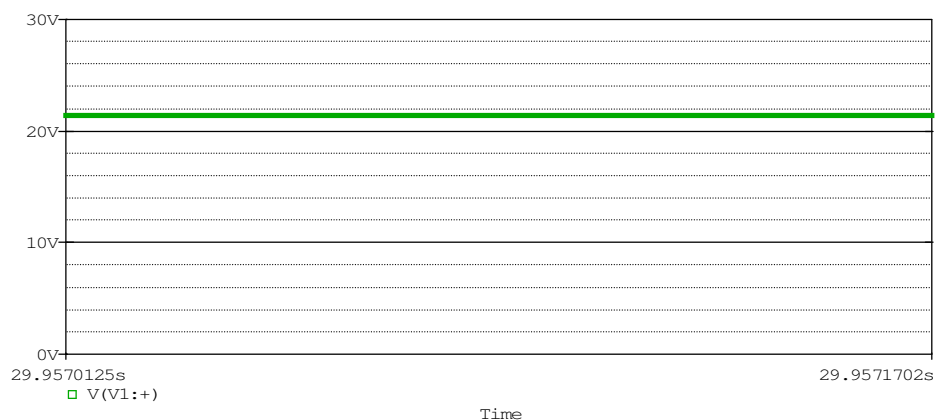
O circuito utilizado para simulação, em malha aberta, no ORCAD CAPTURE 10.3 é mostrado na Figura 3.8. Como o conversor *boost* possui característica de fonte de tensão na saída e duas fontes de tensão não podem ser conectadas em paralelo, foram adicionados RL e Rc2 representando, respectivamente, a resistência da carga, a resistência do cabo acrescida da resistência interna do ultracapacitor.

Figura 3.8 – Circuito utilizado para simulação do conversor *boost* no *ORCAD CAPTURE 10.3*.



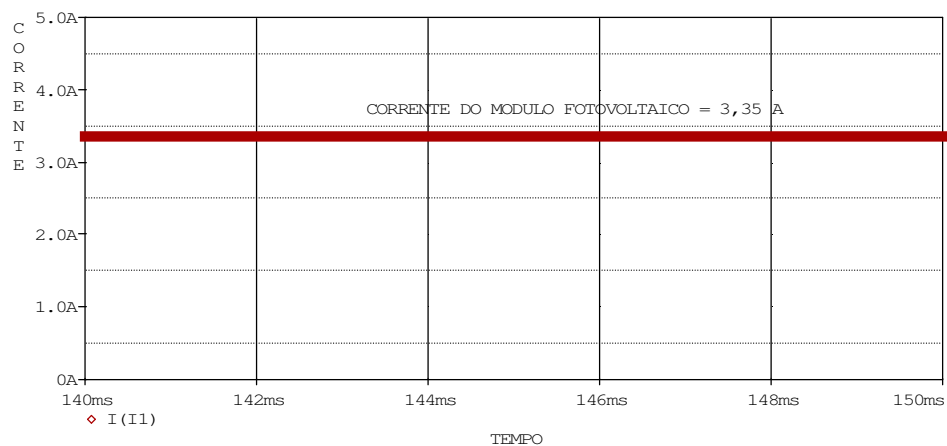
A tensão no painel é mostrada na simulação da Figura 3.9. Pode ser observado que a tensão no painel é a do ponto de sua máxima potência.

Figura 3.9 – Tensão no módulo fotovoltaico.



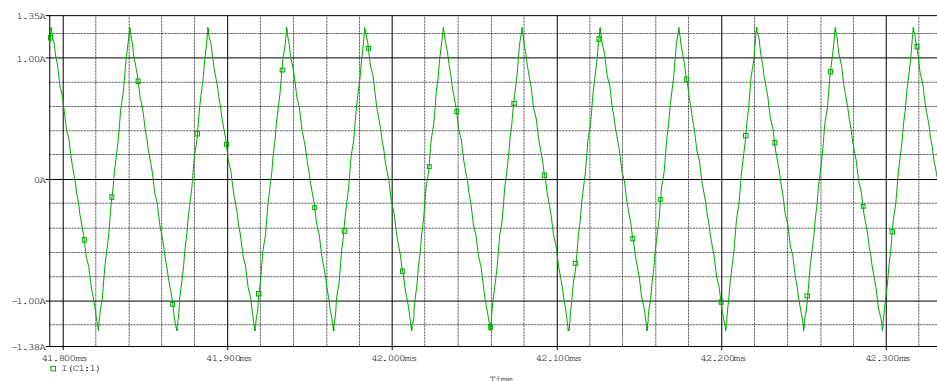
A corrente no painel fotovoltaico na simulação é mostrada na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Corrente no módulo fotovoltaico.



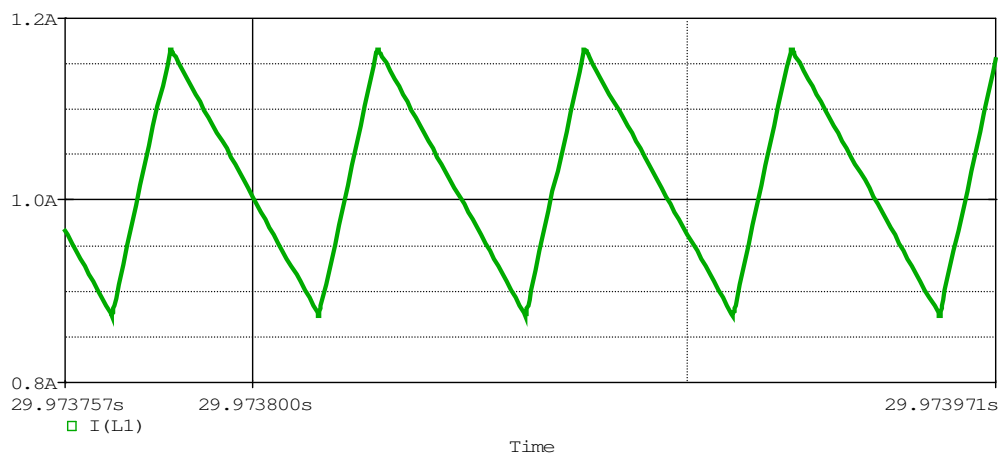
É observada uma pequena ondulação na corrente a qual fica mais visível na Figura 3.11, contudo esta pequena ondulação não afeta a carga dos ultracapacitores e nem a sua vida útil.

Figura 3.11 – Ondulação da corrente de carga nos ultracapacitores.

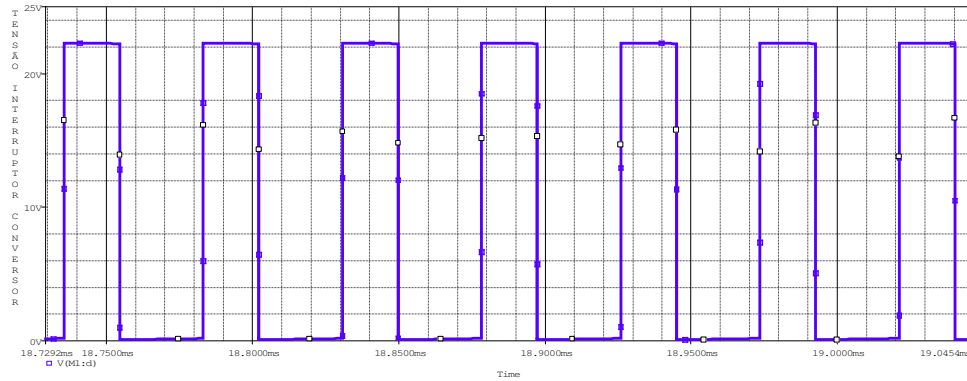


Na Figura 3.12 pode ser observada a corrente no indutor. É visível o seu funcionamento em condução contínua, pois a corrente nunca se anula.

Figura 3.12 – Corrente no indutor do conversor *boost*.



Na Figura 3.13 é mostrada a tensão no interruptor do *boost*. Como o próprio capacitor da saída grampeia a tensão, não é necessário nenhum circuito para proteger o interruptor de sobretensões.

Figura 3.13 – Tensão no interruptor do conversor *boost*.

3.4 Dimensionamento e Simulação do Conversor Buck

De acordo com as especificações adotadas na Tabela 11, são dimensionados os componentes que constituem o conversor CC-CC tipo *buck*.

Tabela 11 – Especificações para o dimensionamento do conversor *buck*.

Especificações para o Dimensionamento do Conversor Buck	
Parâmetro	Valor
V_g – Tensão máxima de entrada do barramento	29,7 V
ΔV_{c_buck} – Variação da ondulação de tensão de saída do <i>buck</i>	1% da tensão na saída
$V_{e\_mín}$ – Tensão mínima de entrada do barramento	17 V
V_{carga} – Tensão nominal de alimentação da carga	13,75 V
I_{carga} – Corrente nominal da carga fornecida pelo fabricante	1 A
P_o – Potência nominal de saída do conversor <i>buck</i>	25 W
ΔI_{L_buck} – Ondulação de corrente na entrada do indutor do <i>buck</i>	10 % da corrente de entrada
f_{sbuck} – Frequência da comutação no <i>buck</i>	21 kHz
$\Delta V_{\_buck}$ – Variação de tensão na entrada do <i>buck</i>	0,2 % da tensão de entrada

Para simulação, a carga é considerada como um resistor. O valor desse resistor é obtido considerando-se o conversor operando na potência nominal de saída. A partir destes dados, tem-se a seguir o dimensionamento dos componentes, para simulação com o programa *Orcad Capture 13*.

O cálculo do resistor de carga é dado pela Equação 44.

$$R = \frac{V_{carga}^2}{P_o} = \frac{13,75^2}{25} = 7,563 \, \Omega \quad (44)$$

O cálculo do ponto de operação é dado de acordo com a razão cíclica de trabalho do transistor S_{buck} . É calculado dividindo-se a tensão de entrada pela tensão de saída, onde $V_c = V_{carga}$, resultando na Equação 45.

$$D = \frac{V_{carga}}{V_g} = \frac{13,75}{29,7} = 0,463 \quad (45)$$

Calculando-se a razão cíclica de trabalho da “parte passiva” do interruptor PWM, ou seja, do diodo D_{buck} . É óbvio que quando o interruptor acha-se em condução o diodo está bloqueado, e vice-versa. Assim, a razão cíclica do diodo D_{buck} é o complemento da razão cíclica do transistor S_{buck} , que é dado pela Equação 46 [2].

$$D' = 1 - D = 1 - 0,463 = 0,537 \quad (46)$$

Para o cálculo do capacitor de filtragem utiliza-se a Equação 47, a qual determina que a corrente nominal de saída do conversor é expressa por:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{25}{13,75} = 1,818 \text{ A} \quad (47)$$

Com isso, calcula-se o valor mínimo necessário do capacitor de filtragem, de modo a garantir o valor de “ripple” da tensão especificada usando-se a Equação 48 [2].

$$C_{min} = \frac{\Delta I_{L\_buck}}{2 \cdot \pi \cdot f_{sbuck} \cdot \Delta V_{buck}} = \frac{10\% \cdot 1,818}{2,3,1415 \cdot (21 \cdot 10^3) \cdot (0,2\% \cdot 17)} = 4,0524 \text{ nF} \quad (48)$$

No projeto foi dimensionado um capacitor de 10 nF/35 V.

Para fins de montagem e segurança do circuito de proteção na entrada do conversor *buck*, foi colocado um fusível de 2,5 A e foram utilizados três capacitores de 470 μ F/35 V em paralelo. Esta medida possibilitou diminuir a resistência série equivalente e dividiu a corrente que circulava por estes capacitores.

O valor do ciclo de carga mínimo para o conversor *buck* é dado pela Equação 49.

$$D_{min} = \frac{V_{carga}}{V_g} = \frac{13,75}{29,7} = 0,46 \quad (49)$$

Onde:

$V_g \rightarrow$ tensão máxima na entrada do barramento do conversor *buck*

$V_{carga} \rightarrow$ tensão na saída do conversor *buck* que alimenta a carga

O valor do ciclo de carga máximo para o conversor *buck* é dado pela Equação 50 [2].

$$D_{max} = \frac{V_{carga}}{V_{e\_min}} = \frac{13,75}{17,4} = 0,79 \quad (50)$$

Onde:

$V_{e\_min} \rightarrow$ tensão mínima na entrada do conversor *buck*

$V_{carga} \rightarrow$ tensão na saída do conversor *buck* que alimenta a carga

A corrente máxima da carga (I_{carga}) fornecida pelo fabricante do transceptor é 1 A. O valor da ondulação de corrente do indutor fornecida à carga pelo conversor *buck* é dado

pela Equação 51 [2].

$$\Delta I_{L\_Buck} = D_{m\acute{a}x} \cdot I_{carga} = 0,79 \cdot 1 = 0,79 \text{ A} \quad (51)$$

Assim, o cálculo do indutor do conversor *buck* (L_{Buck}) é dado pela Equação 52.

Considerando $D = 50\%$ do ciclo de trabalho, calcula-se o valor do indutor do conversor *buck* [2],

$$L_{Buck} = \frac{(1-D) \cdot D \cdot V_g}{f_{sbuck} \cdot \Delta I_{L\_Buck}} = \frac{(1-0,5) \cdot 0,5 \cdot 29,7}{21000 \cdot 0,79} = 447,56 \mu\text{H} \quad (52)$$

Na prática, deve-se adotar um indutor com valor superior ao que foi calculado com a expressão anterior. Isso é feito de modo a garantir o modo de condução contínuo (MCC) em toda a faixa de operação do conversor. Por este motivo, e devido ao enrolamento ter sido feito de forma manual no Laboratório do GPEC, após a confecção do indutor, mediu-se no indutímetro o valor $L_{Buck} = 472,13 \mu\text{H}$, a resistência do enrolamento do indutor medido foi $116 \text{ m}\Omega$. Como este valor de indutância é baixo, provavelmente o indutor terá um número reduzido de espiras. Assim, pode-se imaginar que a resistência do indutor é desprezível e utiliza-se $RL = \text{zero}$ nas simulações do circuito chaveado e também nas equações do modelo de Vorpérian.

O valor do capacitor de saída do conversor *buck* (C_{Buck}) é dado pela Equação 53 [2].

$$C_{Buck} = \frac{(1-D_{m\acute{a}x}) \cdot D_{m\acute{a}x} \cdot V_{m\acute{a}x}}{8 \cdot f_{sbuck}^2 \cdot \Delta V_{C\_Buck}} \quad (53)$$

Onde:

$$\Delta V_{C\_Buck} = 1\% V_{carga} = 0,01 \times 13,75 \rightarrow \Delta V_{C\_Buck} = 0,1375 \text{ V, logo,}$$

$$C_{Buck} = \frac{(1-0,79) \cdot 0,79 \cdot 29,7}{8 \cdot 21000^2 \cdot 0,1375} = \frac{4,92723}{485,1 \cdot 10^6} = 10,157 \text{ nF}$$

O efeito da resistência série do capacitor é dado pela ondulação da tensão da carga pela ondulação da corrente da carga, que é dado pela Equação 54.

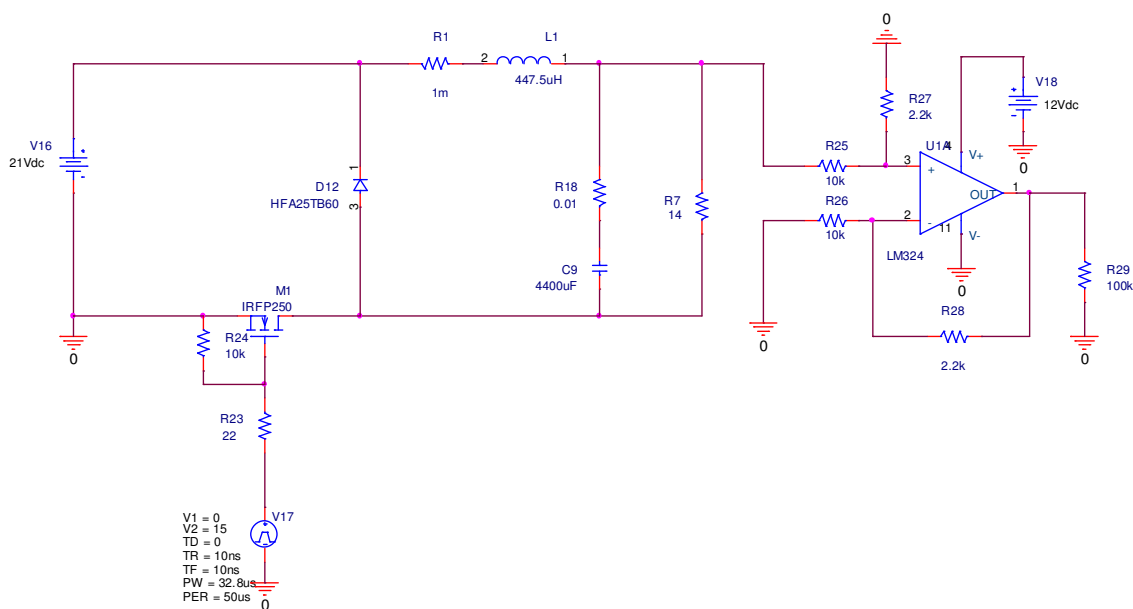
$$R_{RSE\_Buck} = \frac{\Delta V_{C\_Buck}}{\Delta I_{L\_Buck}} = \frac{0,1375}{0,79} = 0,174 \Omega \quad (54)$$

A resistência série máxima do capacitor da EPCOS modelo B41821, 120 Hz, 650 mA, 35 V é $ESR_{m\acute{a}x\_Buck} = 0,49 \Omega$.

Para efeito de montagem na saída do conversor *buck* e como proteção da carga do sistema utilizou-se o capacitor comercial da EPCOS no valor de $C = 1000 \mu\text{F}$, $ESR = 0,15 \Omega$, tensão de operação 35 V.

O circuito utilizado para simulação no *ORCAD CAPTURE 10.3* é mostrado na Figura 3.14, utilizou-se dois capacitores de 2200 μF em paralelo totalizando 4400 μF na saída do conversor *buck*. Como o conversor *buck* controla a componente CC com uma tensão pulsada na saída, que é sempre o objetivo de produzir uma saída que é puramente CC. Um modo de se obter uma saída CC do circuito é inserindo um filtro passa baixas depois da chave. A figura mostra um filtro LC adicionado ao conversor básico. O diodo proporciona um caminho para a corrente no indutor quando a chave é aberta e é polarizada reversamente quando a chave é fechada. [34].

Figura 3.14 – Circuito utilizado para simulação do conversor *buck* no *ORCAD CAPTURE 10.3*.



A tensão no banco de ultracapacitores é mostrada na Figura 3.15. Observa-se a falta de ondulação da tensão o que garante estabilidade de energia na entrada do conversor *buck*.

Figura 3.15 – Tensão nos ultracapacitores na entrada do conversor *buck* com *ORCAD CAPTURE 10.3*.

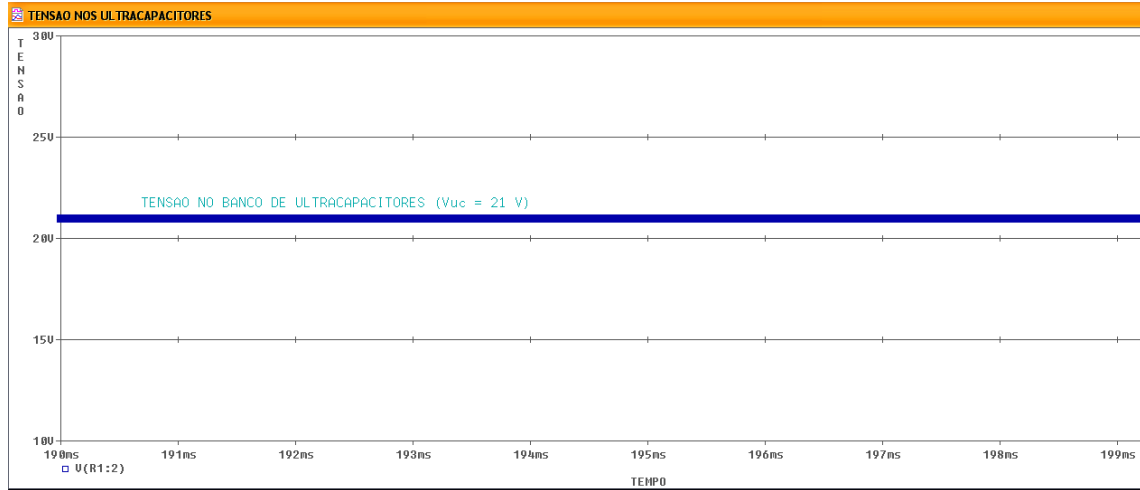
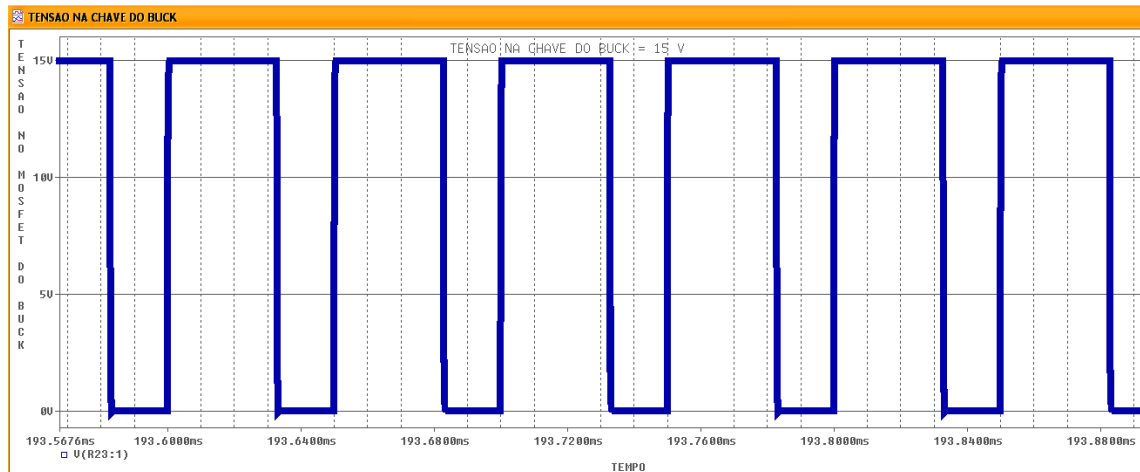


Figura 3.16 – Tensão na chave de entrada do conversor *buck* com *ORCAD CAPTURE 10.3*.



3.4.1 Dimensionamento do indutor buck

Com o uso do conceito do “Interruptor PWM” apresentado por Vorpérian [63,64], torna-se extremamente simples e rápida a simulação de conversores estáticos CC-CC utilizando modulação por largura de pulso. O presente trabalho mostra o uso dessa técnica através de simulações de um conversor tipo *buck*, usando o programa *Orcad Capture 13.0*.

Como a corrente média que circula na fonte de entrada $V_{e\_mín}$ é a mesma que circula pelo indutor L_{buck} , a corrente eficaz que circula pelo enrolamento do indutor é encontrada usando a Equação 55. Assim, substituindo valores da Tabela 11, tem-se:

$$I_{L2ef} = \frac{P_o}{V_{e\_mín}} = \frac{25}{17} = 1,47 \text{ A} \quad (55)$$

A corrente de pico através do indutor é dada pela Equação 56, substituindo os valores na equação resulta:

$$I_{L2pico} = I_{L2ef} + \frac{\Delta I_{L2ef}}{2} = 1,47 + \frac{0,10 \cdot 1,47}{2} = 1,54 \text{ A} \quad (56)$$

O produto das áreas do núcleo do indutor do *buck* é dado pela Equação 57.

$$Ae \cdot Aw_{buck} = \frac{L_{buck} \cdot I_{L2pico} \cdot I_{L2ef} \cdot 10^4}{K_W \cdot J_{max} \cdot B_{max}} = \frac{447,56 \cdot 10^{-6} \cdot 1,54 \cdot 1,47 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 450 \cdot 0,30} = 0,107215 \text{ cm}^4 \quad (57)$$

Onde:

Ae	Área efetiva da perna central do núcleo
Aw	Área da janela do carretel
$Ae \cdot Aw_{buck}$	Produto das áreas desejado do indutor do <i>buck</i> [cm ⁴]
$K_W = 0,7$	Fator de utilização da área da janela (enrolamento)
$J_{max} = 450 \text{ A/cm}^2$	Densidade de corrente elétrica máxima
$B_{max} = 0,30 \text{ T}$	Densidade de fluxo magnético máximo

Baseado no cálculo do produto das áreas, escolheu-se o núcleo de ferrite para a confecção do indutor *buck*.

Assim, foi escolhido o núcleo NEE-40/17/12 da *Thornton*, cujos dados estão na Tabela 12 [61].

Tabela 12 – Características do núcleo NEE-40/17/12 [76.]

Características do núcleo de ferrite do buck	
Ae.Aw – Produto das áreas	2,28 cm ⁴
Ae – Área efetiva da perna central	1,48 cm ²
Aw – Área da janela do carretel	1,54 cm ²
Ve – Volume do núcleo	11,30 cm ³

O número de espiras do indutor do *buck* é dado pela Equação 58 [62], substituindo os valores obtém-se:

$$N_{esp} = \frac{L_{buck} \cdot I_{L2ef}}{Ae \cdot B_{max}} = \frac{447,56 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{1,48 \cdot 10^{-4} \cdot 0,30} = 15 \text{ espiras} \quad (58)$$

O entreferro total do indutor do conversor do *buck* é determinado pela Equação 59,

$$l_{gbuck} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot N_{esp}^2 \cdot Ae \cdot 10^{-2}}{L_{buck}} = \frac{4 \cdot 3,1415 \cdot 10^{-7} \cdot 15^2 \cdot 1,48 \cdot 10^{-2}}{447,56 \cdot 10^{-6}} = 0,0935 \text{ cm} \quad (59)$$

Para o caso de núcleos de ferrite com formato EE, o valor do entreferro deve ser ajustado em $\frac{l_{gbuck}}{2}$.

A profundidade de penetração da corrente no condutor é dada em pela Equação 60 [62] e substituindo valores obtém-se:

$$\delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_{sbuck}}} = \frac{7,5}{\sqrt{21000}} = 0,05175 \text{ cm} \quad (60)$$

Para reduzir o efeito pelicular (*skin effect*) o diâmetro do condutor não poder ser maior que duas vezes o valor de δ . A bitola do condutor depende da densidade de corrente máxima. Portanto, o diâmetro do fio (Φ) escolhido deve ser menor que o valor calculado com a Equação 61.

$$\Phi = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,05175 = 0,10350 \text{ cm} \quad (61)$$

De acordo com o cálculo do diâmetro do fio, determinou-se a escolha do condutor para a confecção do indutor *buck*.

O diâmetro calculado corresponde ao fio 18AWG, que é muito rígido para dobrar, executar o enrolamento e ocupa uma área muito grande da janela do núcleo, por esse motivo, é adotado o fio 27AWG, que é mais flexível e se adapta melhor à área da janela do núcleo.

A área total do condutor depende da densidade de corrente máxima, é encontrada usando-se a Equação 62 [62] e substituindo valores obtém-se:

$$A_{fiobuck} = \frac{I_{L2ef}}{J_{max}} = \frac{1,47}{450} = 0,00327 \text{ cm}^2 \quad (62)$$

O fio 27 AWG possui área de cobre sem isolamento de $0,001021 \text{ cm}^2$ e incluindo o isolamento $0,001244 \text{ cm}^2$.

A seguir é definida a quantidade de fios em paralelo usando a Equação 63.

$$N_{fios\_paralelos\_buck} = \frac{A_{fiobuck}}{A_{fio\_27AWG}} = \frac{0,00327}{0,001021} = 3,199 \approx 4 \text{ fios paralelos} \quad (63)$$

O fator de utilização da janela do núcleo com o fio adotado é encontrado com a Equação 64.

$$T_{AWG27} = \frac{N_{esp} \cdot N_{fios\_paralelos\_buck} \cdot A_{fio\_isolamento}}{A_w} = \frac{15 \cdot 4 \cdot 0,001244}{1,48} = 0,05043 \quad (64)$$

O valor calculado do fator de utilização da janela ou fator de enrolamento é menor que o valor adotado e está dentro do especificado em [62]. Portanto, o indutor é construído sem problemas.

As características físicas do indutor do conversor *buck* são dadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características físicas do indutor *buck*.

Características físicas do indutor <i>buck</i>	
Núcleo de ferrite utilizado	NEE – 40/17/12 da Thornton
Número de espiras	15
Fio utilizado	4 × 27 AWG
Comprimento total do fio AWG27 utilizado	8,09 m
Entreferro	0,7 mm
Densidade de fluxo utilizada	0,3 Tesla

3.5 CIRCUITO DE CONTROLE E ALGORITMO

3.5.1 Algoritmo de MPPT

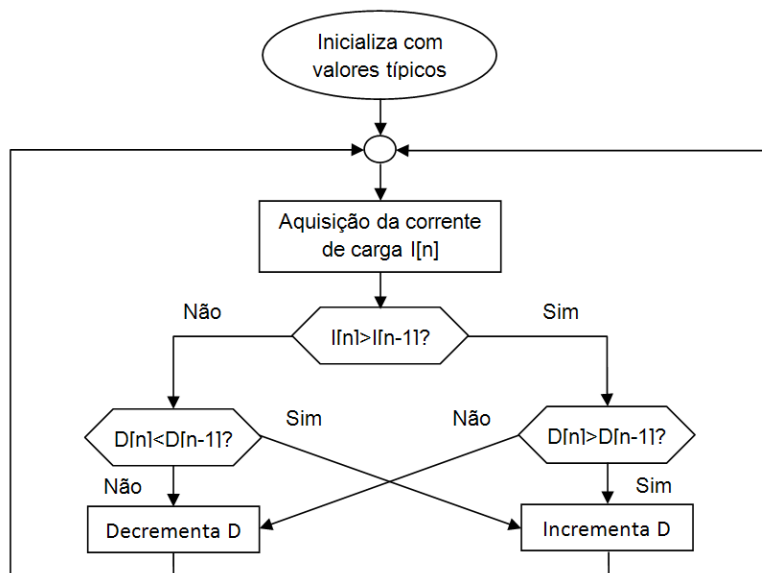
O algoritmo de procura do ponto de máxima potência é semelhante ao utilizado por [60], porém utilizando a corrente de carga dos ultracapacitores.

A busca do ponto de máxima potência MPPT é feita amostrando a corrente de carga da bateria usando um sensor resistivo, e adicionando um amplificador diferencial para amplificar a queda de tensão sobre este. Esta queda de tensão é enviada ao microcontrolador, que a compara com valor anterior. Caso o valor da tensão seja maior que o anterior, a razão cíclica é decrementada.

A lógica deste processo é apresentada no fluxograma da Figura 3.17, sendo $I(n)$ a corrente de carga amostrada, D a razão cíclica e $D[n]$ a razão cíclica amostrada.

O fluxograma apresenta o algoritmo do método de controle MPPT proposto, chamado de perturba e observa (P&O), onde as informações sobre a radiação solar não são necessárias. Para buscar o ponto de operação de máxima potência e acompanhar este ponto a fim de reduzir o erro entre a potência de operação e a potência máxima, em caso de mudança da incidência solar, o controle do conversor *boost* perturba periodicamente o ponto de operação do painel solar. Ao adquirir a corrente de saída, o controle usa esta informação para aumentar ou diminuir o ciclo de trabalho do conversor *boost* para alterar o ponto de operação do módulo fotovoltaico. Após a perturbação, há um deslocamento do ponto de operação de $(k-1)$ para (k) [59], conforme Figura 1.19.

Figura 3.17 – Rotina para obtenção do ponto de máxima potência.

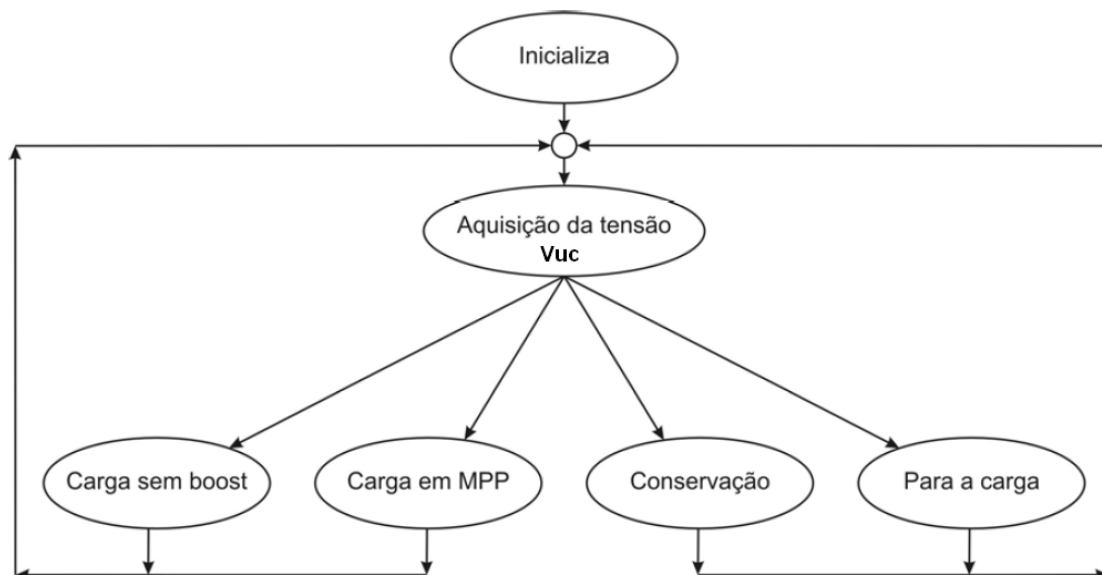


O arranjo do sistema MPPT está conectado ao conversor *boost*. Através de um algoritmo de controle sobre os interruptores S_1 (SWbst) e S_2 (SWbck), Apêndice B, o ciclo de trabalho é modificado de modo a variar a potência extraída a partir do painel fotovoltaico, até que o produto da tensão e da corrente de saída do conversor seja máximo. No entanto, como a tensão nos terminais dos ultracapacitores pode ser considerada constante durante duas amostras consecutivas, o algoritmo verifica apenas a variação da corrente. Enquanto isso, o conversor *buck* controla a tensão do barramento CC. Esse controle é feito continuamente pelo sistema sobre as condições de incidência solar nominal.

O painel fotovoltaico utilizado no projeto fornece a corrente máxima que equivale à corrente de curto-circuito (I_{SC}), a tensão máxima que equivale à tensão em circuito aberto (V_{OC}). A corrente nominal equivale à corrente em MPP (I_{mp}) e a tensão nominal que equivale à tensão MPP (V_{mp}). Estes valores são fornecidos para uma radiação de 1.000 W/m^2 e temperatura de 25°C .

O processo de carga do ultracapacitor inicializa e efetua a aquisição da tensão do banco de ultracapacitores (V_{uc}) para estimar a sua carga, o que determina a razão cíclica inicial do conversor *boost*. Dependendo da tensão nos ultracapacitores o programa executa as funções mostradas na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Processo de carga dos ultracapacitores.



As condições para carga dos ultracapacitores na temperatura de 25°C são [5]:

1. $V_{uc} < 12 \text{ V}$ (Ultracapacitores muito descarregados. A carga é feita através do diodo do *boost*).
2. $12 \text{ V} \leq V_{uc} < 21 \text{ V}$ (Carga no ponto de máxima potência).
3. $21 \text{ V} \leq V_{uc} < 29,7 \text{ V}$ (Carga de conservação, ultracapacitores carregados com 70%).
4. $V_{uc} > 29,7 \text{ V}$ (Ultracapacitores completamente carregados e o conversor é desligado).

O banco de ultracapacitores pode ser considerado, em um curto período de tempo, como uma fonte de tensão constante. Para obtenção do ponto de máxima potência é necessário apenas monitorar a corrente de carga do banco de ultracapacitores e não a potência de saída do painel, que é normalmente utilizada.

Esta técnica apresentada no tópico 2.6.1 foi usada neste projeto devido a sua simplicidade de implementação. A busca do ponto de máxima potência, MPP, é realizada observando a corrente de recarga do banco de ultracapacitores, uma vez que a tensão em seus terminais pode ser considerada constante num período de chaveamento.

De acordo com o fabricante dos ultracapacitores, a máxima tensão recomendada sobre cada componente é 2,7 V a uma temperatura de 25°C. Nesta aplicação, o circuito de controle com MPPT é polarizado usando uma fonte auxiliar alimentada pelo banco de ultracapacitores, fornecendo +5 V para o microcontrolador dsPIC30F2020 e +15 V para o *driver* do MOSFET e outros periféricos do sistema, ver Apêndices.

CAPÍTULO 4

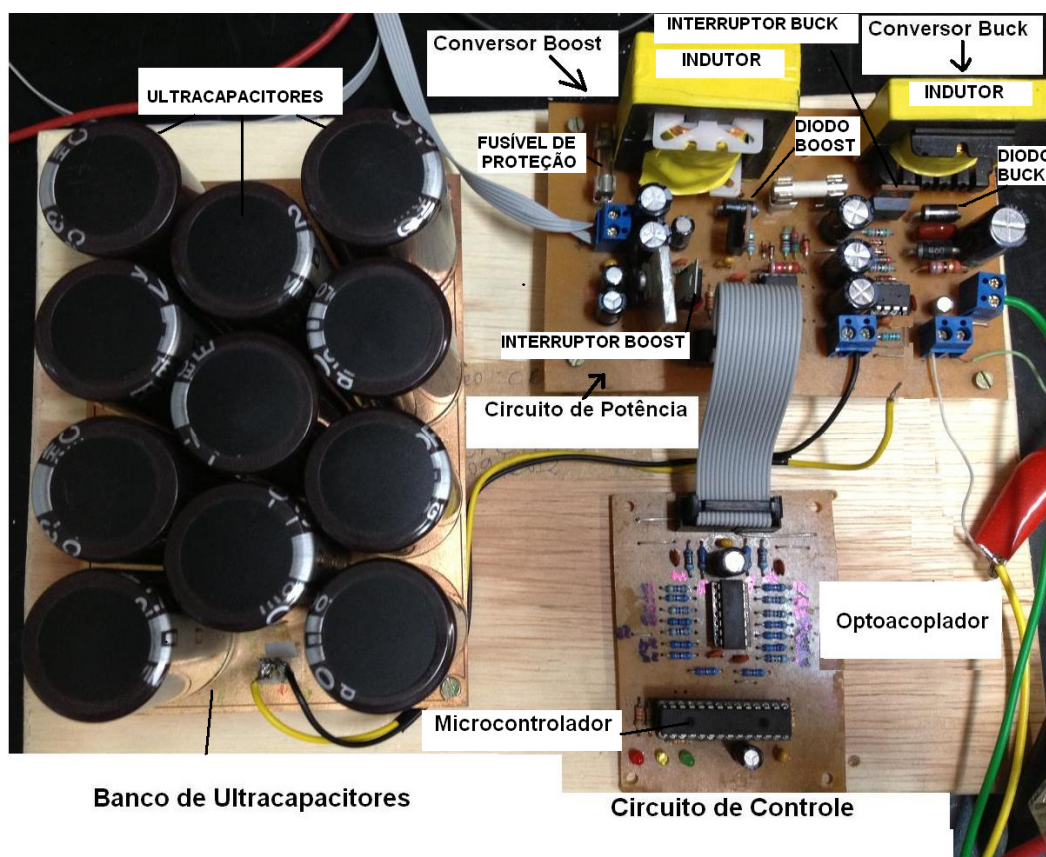
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

São apresentados neste capítulo os resultados experimentais do protótipo. A fonte consta de dois estágios de processamento de energia, sendo o primeiro estágio um controlador de carga dos ultracapacitores baseado no conversor *boost* clássico que tem a função de extrair a energia do módulo fotovoltaico e enviar aos ultracapacitores; e o segundo estágio composto de um conversor *buck* abaixador de tensão que extrai dos ultracapacitores 21 V a energia necessária para transferência de 13,75 Vcc para alimentar o transceptor.

4.1 Protótipo montado

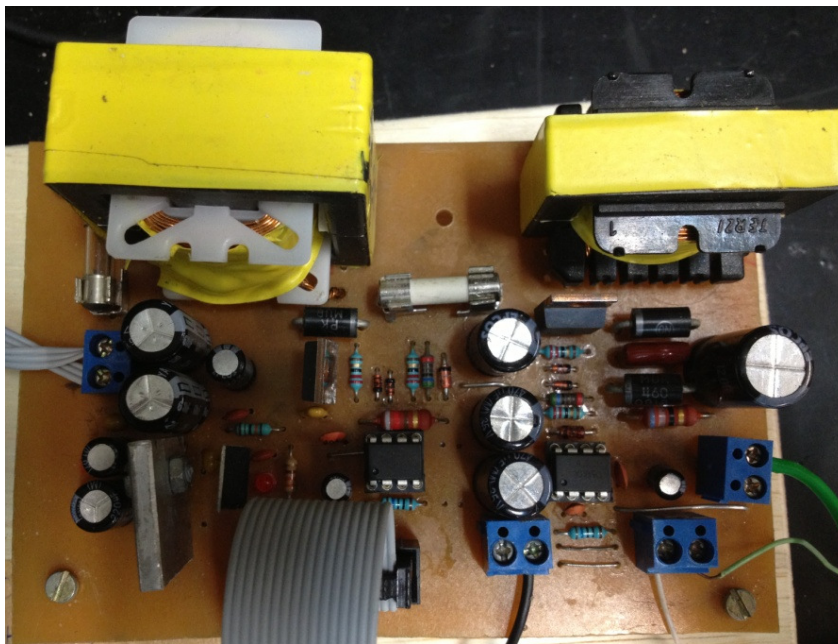
A foto do protótipo implementado em laboratório é mostrada na Figura 4.1. Aqui são mostrados os ultracapacitores conectados em série, o conversor *boost*, o conversor *buck* e o circuito de controle.

Figura 4.1 – Foto do protótipo implementado.



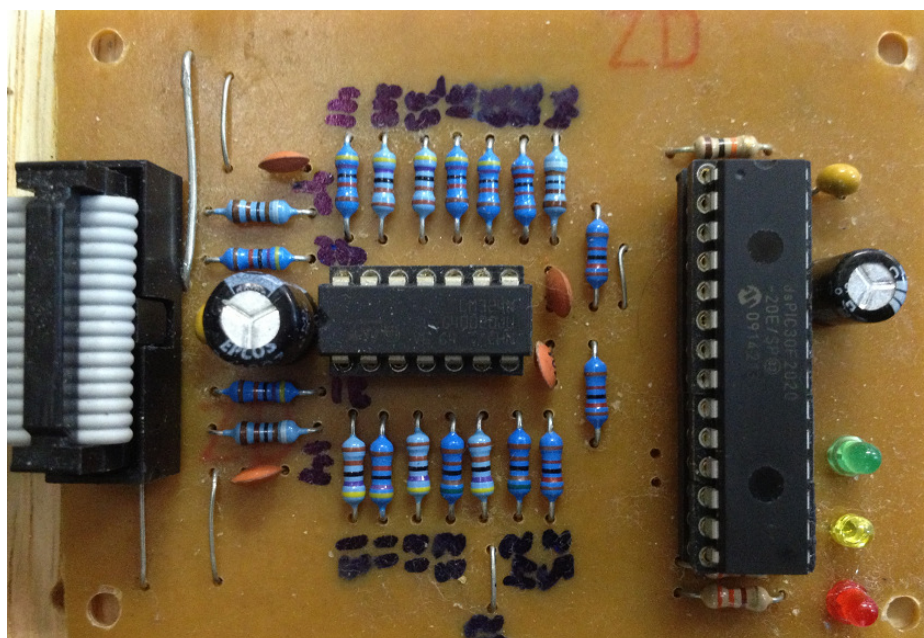
Na Figura 4.2 é mostrada a foto do circuito de potência com os conversores *boost* e *buck*.

Figura 4.2 – Circuito de Potência - Conversores *Boost* (esquerda) e *Buck* (direita).



Na Figura 4.3 é mostrada a foto do circuito de controle com o microcontrolador dsPIC30F2020 da *Microchip Technology* de 28 pinos que funciona como controlador de sinal digital de 16 bits.

Figura 4.3 – Circuito de Controle do Sistema



Esse módulo de alimentação possui como características 4 geradores PWM com 8 saídas e cada gerador PWM tem base de tempo e ciclo de trabalho independentes. A fonte de alimentação do módulo PWM no dispositivo dsPIC30F2020 suporta uma grande variedade de modos e formatos de saída de PWM. Este módulo PWM é ideal para aplicações de conversão de energia, tais como, conversores CC/CC, fontes de alimentação CA/CC e fontes de alimentação ininterrupta (UPS).

O período de PWM pode ser calculado usando a Equação 65.

$$\text{Período PWM} = [(PRx)+1].4.Tosc(TMRx \text{ valor prescale}) \quad (65)$$

A frequência PWM é definida pela Equação 66.

$$\text{Frequência PWM} = 1/\text{Período PWM} \quad (66)$$

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram as medidas reais dos indutores do *boost* e do *buck* feitas com o instrumento indutímetro da fabricante FLUKE.

Figura 4.4 – Medida do indutor do *boost*.

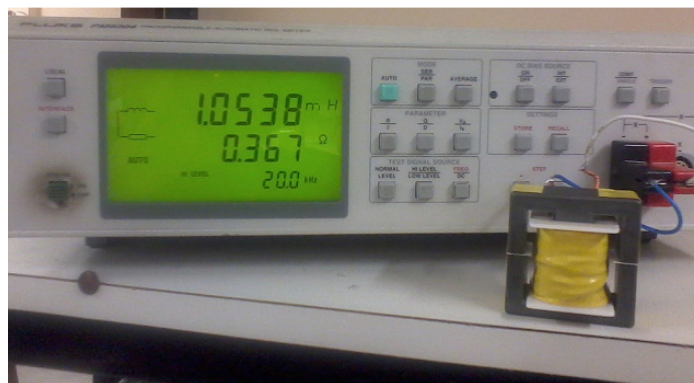


Figura 4.5 – Medida do indutor do *buck*.

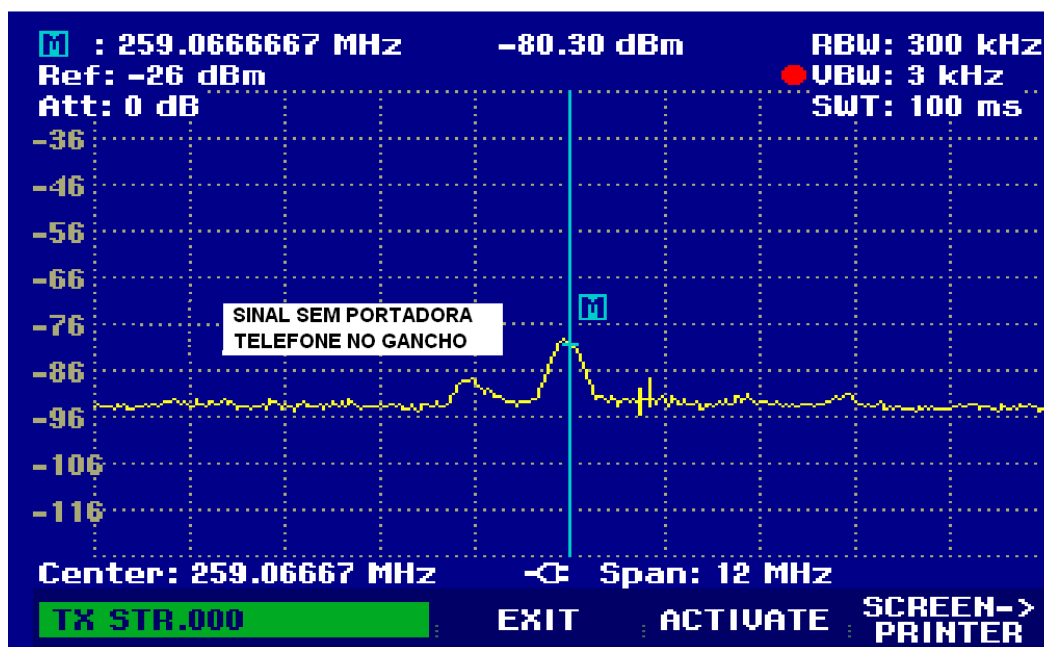


As Figuras 4.6 e 4.7 mostram o transceptor ativado, mas o telefone encontra-se com o monofone no gancho. Não há estabelecimento de uma conexão telefônica por parte do assinante. Assim sendo, não existe um sinal da portadora presente no analisador de espectro.

Figura 4.6 – Transceptor ativado e telefone com monofone no gancho.



Figura 4.7 – Análise espectral do transceptor sem sinal da portadora com o monofone no gancho.



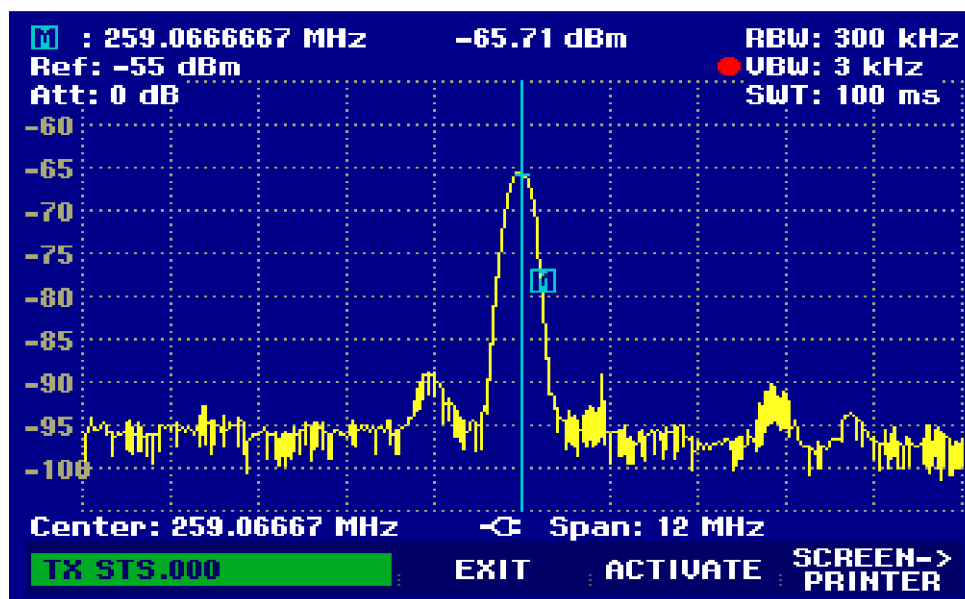
A Figura 4.8 detalha os instrumentos e equipamentos utilizados nas medições dos sinais do transceptor de rádio monocanal.

Figura 4.8 – Transceptor ativado com chamada telefônica em andamento e monofone fora do gancho.



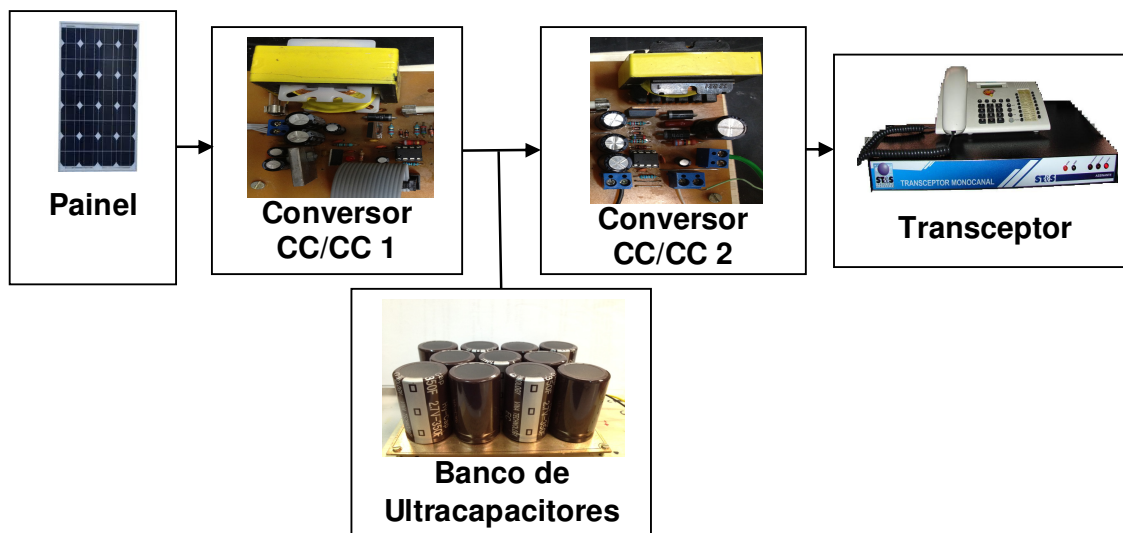
A Figura 4.9 mostra o gráfico da análise espectral da frequência da portadora gerada pelo transceptor em 259,066 MHz. O telefone foi retirado do gancho pelo usuário e foi estabelecida uma chamada telefônica pelo assinante, comprovando seu funcionamento.

Figura 4.9 – Análise espectral da onda portadora do transceptor ativado na frequência de 259,066 MHz



A Figura 4.10 mostra o diagrama de blocos do sistema montado no projeto.

Figura 4.10 – Diagrama de blocos do sistema montado no projeto.



As Figuras 4.11 e 4.12 mostram, respectivamente, os gráficos dos resultados experimentais da tensão na chave e a corrente no indutor, e, tensão e corrente na carga do conversor *boost*.

Figura 4.11 – Tensão na chave e corrente no indutor do *Boost*. (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 1 A/Div).

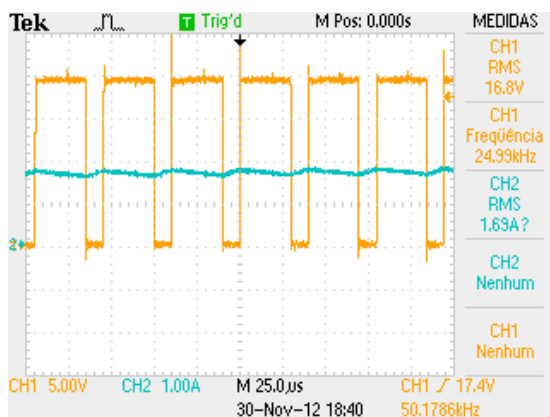
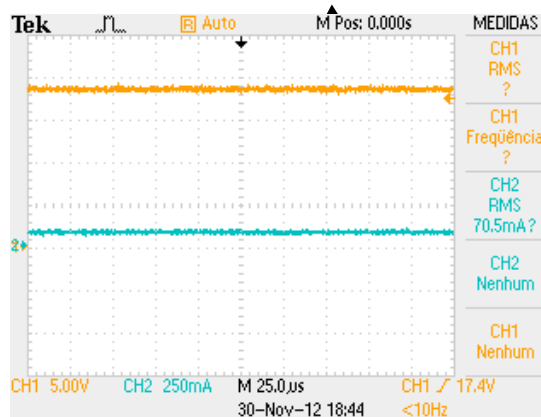


Figura 4.12 – Tensão e corrente na carga do conversor *Boost*. (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 250 mA/Div).



As Figuras 4.13 e 4.14 mostram, respectivamente, os gráficos dos resultados experimentais da tensão na chave e a corrente no indutor, e, tensão e corrente na carga do conversor *buck*.

Figura 4.13 – Tensão na chave e corrente no indutor do *Buck*. (Canal 1: 5 V/div, Canal 2: 250 mA/div).

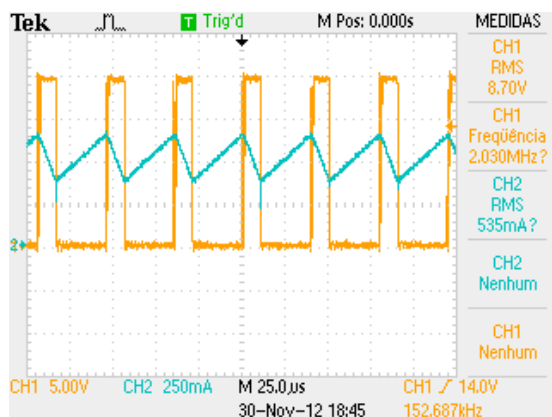
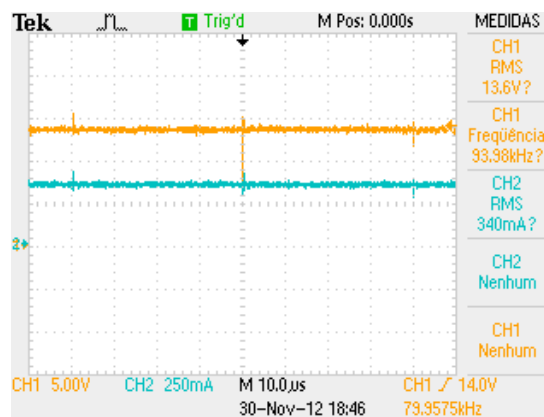


Figura 4.14 – Tensão e corrente na carga do conversor *Buck*. (Canal 1: 5 V/div e Canal 2: 250 mA/Div).



Através de simulações realizadas com o *ORCAD CAPTURE CIS 10.3*, que foram mostradas no capítulo 3, os resultados foram comparados com os calculados, o que validou o modelo matemático utilizado para o circuito.

O sistema opera durante todo o período em que estiver ativado. Como o painel depende da temperatura e da incidência solar, haverá dias em que não aparecerá sol forte, e a energia do painel a ser transferida para o sistema ficará reduzida. Dessa forma para alimentar o transceptor será necessário fornecer energia a ser retirada dos ultracapacitores. O transceptor precisa ser alimentado em no mínimo 12 V, mas a programação do sistema da placa de controle vai operar na faixa de 12 a 21 V. O banco de ultracapacitores será limitado à tensão máxima de 21 V, mesmo sendo capaz de suportar até 29,7 V, neste projeto optou-se em limitar seu uso como proteção do sistema de energia a qual será transferida do painel para os ultracapacitores através do conversor *boost*. Devido à descarga dos ultracapacitores, o sistema poderá ficar inoperante por um pequeno período de tempo, visto que é incomum em nossa região o sol não aparecer. E logo ser restabelecida a energia para recarga dos componentes armazenadores.

Para este projeto, o usuário do serviço poderá utilizar o rádio transceptor no período noturno por até 3 horas, ou mais, dependendo da carga dos ultracapacitores e da quantidade de tempo em que o monofone ficará fora do gancho do telefone.

Em três dias de sol intenso em Fortaleza, 18 a 20 de abril de 2012, foi realizada a carga completa nos ultracapacitores no Laboratório do GPEC. Em 18/04/2012 o banco de ultracapacitores começou a ser carregado às 10h25min e alcançou a tensão de 20,02 V após duas horas de carga. Verificou-se que a tensão em cada ultracapacitor chegou a 1,838 V. A

carga permaneceu ligada até o anoitecer. Quando foi estabelecida uma ligação telefônica à noite, verificou-se que a tensão no transceptor estava em torno de 13,85 V e a corrente na carga era de 0,33 A.

O sistema de controle limita a tensão de carga em 21 V para evitar sobretensão e superaquecimento dos ultracapacitores, assim foi limitada a corrente na saída do painel em 2,5 A com a inclusão de um fusível para proteger o conversor *boost*.

No dia 19/04/2012 o painel fotovoltaico que se encontra sobre o telhado do GPEC forneceu a tensão de 18,94 V e a corrente de 1,2 A para o protótipo projetado. Verificou-se que ao entardecer, por volta das 17h, o painel apresentou uma leitura de 12,2 V de tensão e 0,27 A de corrente, e às 17h45min verificou-se a leitura de 11,93 V na tensão e 0,25 A na corrente.

Durante aquela noite o equipamento rádio encontrava-se ligado com a alimentação fornecida pelo banco de ultracapacitores em 12 V. A alimentação do painel foi desligada do restante do sistema naquela noite. No dia seguinte, 20/04/2012, às 08h35min a tensão do banco de ultracapacitores encontrava-se em 9,73 V, desta forma o transceptor mesmo em repouso consome energia devido aos seus circuitos internos de potência.

CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho tratou do projeto e implementação de um sistema fotovoltaico para atendimento a uma comunidade isolada da rede pública de energia e de telecomunicação em que foi utilizado como forma de armazenamento de energia o ultracapacitor.

Foi apresentado o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para alimentar um sistema de telefonia rural em corrente contínua em uma comunidade isolada da rede de energia da concessionária local. O sistema ora projetado não utiliza o inversor para corrente alternada, reduzindo assim custos com equipamentos, bem como não utiliza baterias como forma de armazenamento, diminuindo desta forma, manutenções periódicas, trocas ou substituições devido à vida útil das baterias.

Em vez das baterias foram utilizados ultracapacitores como forma de armazenamento de energia. A maior eficiência foi devido ao conversor elevador CC/CC que é superior a de inversores tanto a plena carga como a vazio.

Inicialmente foi realizado o estudo, em conceitos práticos, sobre as fontes alternativas de energia, especificamente, energia eólica e energia solar. A situação atual do atendimento de energia elétrica no Brasil e foi constatado que cerca de dois milhões de domicílios rurais, em comunidades isoladas da rede pública de energia e de telecomunicações, ainda não possuem fornecimento de energia elétrica bem como rede de comunicação, o que corresponde a cerca de 80% do total nacional de exclusão elétrica. Esses domicílios geralmente estão situados em locais de difícil acesso, distantes do sistema de distribuição convencional e geralmente concentrados em pequenas quantidades de consumidores. Dessa forma torna-se inviável economicamente para as concessionárias realizarem esse atendimento mediante extensão da rede convencional.

Com base nos fatores citados, chegou-se a conclusão que para esse tipo de atendimento, os sistemas fotovoltaicos se tornam bastante atrativos. Especialmente quando o mesmo possui tecnologia nacional, onde os custos são reduzidos, o que não é o caso desse estudo. Por fim apresentou-se o sistema proposto para montagem como protótipo.

Foram apresentados os componentes do sistema utilizado no projeto. Iniciou-se com o estudo da célula fotovoltaica e as características do painel fotovoltaico. Foi feito um estudo exaustivo sobre o ultracapacitor e seu funcionamento para operar como elemento armazenador de energia, em substituição à bateria automotiva, muito utilizada no mundo devido a sua alta capacidade de armazenamento. Apresentou-se uma tabela comparativa entre baterias e ultracapacitores onde foram relatadas as vantagens dos ultracapacitores sobre as

baterias. Realizou-se um breve estudo sobre o aparelho telefônico usado como acessório para o funcionamento do transceptor que é o elemento de carga.

Foi feita uma revisão bibliográfica dos conversores CC-CC, e realizado o estudo da topologia proposta para o carregador dos ultracapacitores.

Foram apresentados seu princípio de funcionamento, etapas de operação, dimensionamento, projeto e resultados de simulação. Através dos resultados de simulação foi possível comprovar que o conversor realmente pode ser dimensionado considerando a equivalência com um conversor elevador (*boost*) e com o conversor abaixador (*buck*).

Foram analisadas seis técnicas de MPPT que são estudadas atualmente para aplicação no sistema apresentado. Optou-se por usar a técnica perturba e observa pela facilidade de implementação no projeto.

De acordo com as necessidades do projeto e as regulamentações da ANEEL e ANATEL o sistema foi dimensionado passando a ser composto por apenas um painel fotovoltaico (MM55 – 55 Wp da Siemens), um conversor elevador, um banco de ultracapacitores como elemento armazenador composto por onze unidades (cada uma com 2,7 V e 350 F), um conversor abaixador, um equipamento transceptor para comunicação telefônica, um aparelho telefônico e uma antena Yagi para recepção e transmissão do sinal de telefonia. Durante os testes de laboratório, com o intuito de se evitar a propagação da radiação eletromagnética, utilizou-se uma carga fantasma, cedida especialmente pela ANATEL, em substituição à antena, para que não fossem irradiadas as radiofrequências geradas pelo transceptor.

Foram apresentados os resultados das simulações com o uso do *software OrCAD Capture CIS 10.3*, e projetados no *Altium* os diagramas das placas dos conversores, dos ultracapacitores, os esquemáticos do circuito de controle, de potência e da fonte auxiliar.

O protótipo final é composto por dois conversores, os quais foram construídos na mesma placa, e por ter os indutores de pequeno porte, ocupado menor espaço, maior rapidez de montagem e menor dificuldade de reparo. Um circuito de controle foi necessário ser montado em uma placa separada para melhorar o manuseio em caso de manutenção e uma placa com os onze ultracapacitores foi confeccionada separada para evitar superaquecimento e como forma de segurança no uso, visto que esses componentes ainda não são habituais em nossos laboratórios. O circuito optoacoplador está implementado na placa do conversor *buck*. O algoritmo do MPPT foi implementado no dsPIC30F2020 instalado na placa de controle.

Foram mostradas as curvas dos resultados experimentais utilizando o osciloscópio digital da fabricante Tektronix, modelo TPS 2014 de quatro canais 100 MHz, 1 GS/s.

Para a instalação do sistema final em campo será realizado um estudo da estrutura a ser utilizada (não incluso nesse trabalho). Optar-se-á por uma que utilize um poste de concreto onde em seu topo já se encontra instalada uma antena VHF Yagi com cabos instalados e um compartimento fechado, e ventilado no intuito de receber e proteger os conversores e os ultracapacitores na forma de abrigo para o rádio transceptor.

Este trabalho tratou do projeto e implementação de um sistema fotovoltaico para atendimento a uma comunidade isolada da rede pública de energia e de telecomunicação em que foi utilizado como forma de armazenamento de energia o ultracapacitor.

O sistema ora projetado não utiliza o inversor para corrente alternada, reduzindo assim custos com equipamentos, bem como não utiliza baterias como forma de armazenamento, diminuindo desta forma, manutenções periódicas, trocas ou substituições devido à vida útil das baterias.

Em vez das baterias foram utilizados ultracapacitores como forma de armazenamento de energia. A maior eficiência pode ser explicada através do rendimento do conversor elevador CC/CC que é superior a de inversores tanto a plena carga como a vazio.

Com base nos fatores citados, chegou-se a conclusão que para esse tipo de atendimento, os sistemas fotovoltaicos se tornam bastante atrativos. Especialmente quando o mesmo possui tecnologia nacional, onde os custos são reduzidos, o que não é o caso desse estudo.

O sistema poderá ser instalado em qualquer localidade que tenha possibilidade de receber um sinal de telefonia. No entanto, serão realizados testes mesmo que na comunidade já disponha do sistema via rádio e que utilize baterias e inversor.

Ainda em relação a trabalhos futuros, pode-se sugerir a realização de um estudo de controle liga/desliga nas células do conversor elevador, no momento em que a carga conectada a sua saída possuir baixa potência no intuito de obter maior rendimento.

REFERÊNCIAS

- [1] ROSA, Victor Hugo da Silva. “Energia elétrica renovável em pequenas comunidades no Brasil: em busca de um modelo sustentável”. Brasília. 2007. 440 p. Disponível em http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/5478/1/2007_VictorHugodaSilvaRosa.pdf
- [2] BARBI, Ivo; “Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados”; Florianópolis, SC; Ed. do Autor, 2000.
- [3] MARKVART, T. Solar Electricity. 2nd ed. 1994 e 2000.
- [4] MORAES, Albemerc Moura de. “Aplicações da tecnologia solar fotovoltaica no Estado do Piauí: barreiras e potencialidades”. Dissertação de mestrado em energia. Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 2009.
- [5] SÁ JÚNIOR, Edilson Mineiro de. “Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponta”; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza, CE; 2004.
- [6] CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Solar: Princípios e Aplicações. 2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em novembro/2011.
- [7] BAJAY, S. V. Mudanças no Planejamento dos Sistemas Elétricos Isolados no Brasil, Relatório MME/PNUD, setembro 2003
- [8] http://www.fucapi.br/tec/imagens/revistas/ed06_completo.pdf T&C Amazônia, Ano III, Número 6, Janeiro de 2005, acesso em novembro 2011.
- [9] ANEEL. Resolução ANEEL N° 493/2012 de 05/06/2012. Diário Oficial da União de 06/06/2012.
- [10] Resolução Normativa N° 83, *Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; Procedimentos e as condições de fornecimento por intermédio de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI; 20 de Setembro de 2004.*
- [11] BORGES, E.; KLAUS, W.; MONTEIRO, C.; SCHWAB, T. Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares – Teste em Campo de um Modelo Sustentável de Eletrificação Rural. II Congresso Brasileiro de Eficiência energética, Vitória-ES, setembro de 2007.
- [12] GOMES, C. M. S.. “Interface de um Painel Solar à Rede Elétrica”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade do Minho, Portugal, 2010.
- [13] ALENCAR, A. F.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; XIMENES, S; CRUZ, C.; SÁ JÚNIOR, E. M.; SILVA, F. S. F. *Off-Grid PV System to Supply a Rural School on DC Network*. 10° International Conference on Renewable Energies and Power Quality - (ICREPQ'10), Granada, Espanha, março de 2010.

- [14] Aplicação de sistemas fotovoltaicos no programa Luz para Todos da COELBA, *COELBA - Grupo Neoenergia*, Hugo Machado Silvia Filho; Workshop Rio 06, Rio de Janeiro, novembro 2006.
- [15] E.D.R.B. Proença,. “A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento”. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [16] PANDEY, A. K. et al. *A simple Single-Sensor MPPT Solution*. IEEE Transactions on Power Electronics, New York, v. 22, n. 6, p. 698–700, 2007.
- [17] YU, G. J. et al. *A Novel Two-Mode MPPT Control Algorithm Based on Comparative Study of Existing Algorithms*. In: Photovoltaic Specialists Conference, 2002, p. 1531-1534.
- [18] HUSSEIN, K. H. et al. *Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions*. IEE Generation, Transmission and Distribution, United Kingdom, v. 142, n. 1, p. 59-64, 1995.
- [19] WASYNEZUK, O. *Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. 102, n. 9, p. 3031-3037, 1983.
- [20] JAINS, S.; AGARWAL, V. *A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaics Systems*. IEEE Power Electronics Letters, v.2, n.3, p. 16-19, 2004.
- [21] HO, B. M. T. et al. *Use of System Oscillation to Locate the MPP of PV Panels*. IEEE Power Electronics Letters, v.2, n.1, p. 1-5, 2004.
- [22] CASADEI, D. et al. *C. Single-Phase Single-Stage Photovoltaic Generation System Based on a Ripple Correlation Control Maximum Power Point Tracking*. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 21, n.2, p. 562-568, 2006.
- [23] CAVALVANTI, M. C. et al. *Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems*. Eletrônica de Potência, v. 12, n. 2, p. 163-171, 2007.
- [24] BRITO, A. G. de; GALOTO, Luiz; SAMPAIO, Leonardo P.; CANESIN, Carlos A. “Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos”. UNESP Ilha Solteira, Laboratório de Eletrônica de Potência, p. 1-6, 2012.
- [25] N. A, R. G, K. A. S, and L. C. J, with S. Balakrishna, Thansoe. *The Study and Evaluation of Maximum Power Point Tracking Systems. International Conference on Energy and Environment 2006 (ICEE 2006)*, pp. 17-22.
- [26] SEGUEL, J. I. L., “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital”. Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG – Escola de Engenharia, 2009.
- [27] ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, 2007, PP. 439-449.

- [28] JAIN, S, AGARWAL, V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems. *Electric Power Applications, IET*, vol. 1, PP. 753-762, 2007.
- [29] Y.-jung M. Tung, D.A.P. Hu, and D.N.-K. Nair. *Evaluation of Micro Controller Based Maximum Power Point Tracking Methods Using dSPACE Platform. Australian University Power Engineering Conference 2006*, 2006.
- [30] SILVA, F. S. F. S.. Sistema fotovoltaico para iluminação e alimentação de pequenos equipamentos em corrente contínua. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza, CE; 2010.
- [31] http://www.ultracapacitors.org/index.php?option=com_content&Itemid=77&id=106&task=view, acesso em setembro 2012.
- [32] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115060215>. Publicação em Redação do Site Inovação Tecnológica - 15/02/2006, acesso em novembro 2011.
- [33] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=separacao-de-nanotubos-metalicos-semicondutores&id=>, acesso em setembro 2012.
- [34] HART, DANIEL W. “Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos”. Porto Alegre, RS; AMGH, 2012.
- [35] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=supercapacitor-solido>, acesso em setembro 2012.
- [36] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=brasileiros-descobrem-nanotubos-metalicos-quadrados&id=010165090130>, acesso em setembro 2012.
- [37] <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1663-ultracapacitores.html>, acesso em setembro/2012.
- [38] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=020115050217>, acesso em setembro 2012.
- [39] <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>, J. A. Pomilio, Componentes Passivos Utilizados em Fontes Chaveadas. arquivo Fontes Chaveadas Cap. 6. Acesso em setembro 2012.
- [40] R. Kotz, M. Carlen. *Principles and Applications of Electrochemical Capacitors*, *Electrochimica Acta*, vol. 45, 2000, pp. 2483-2498
- [41] H. E. Becker, U.S. patent 2 800 616 (to General Electric), 1957.
- [42] D. I. Boos, U. S. Patent 2 536 963 (to Standard Oil, SOHIO), 1970.
- [43] <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/downloads> acesso em outubro 2012.

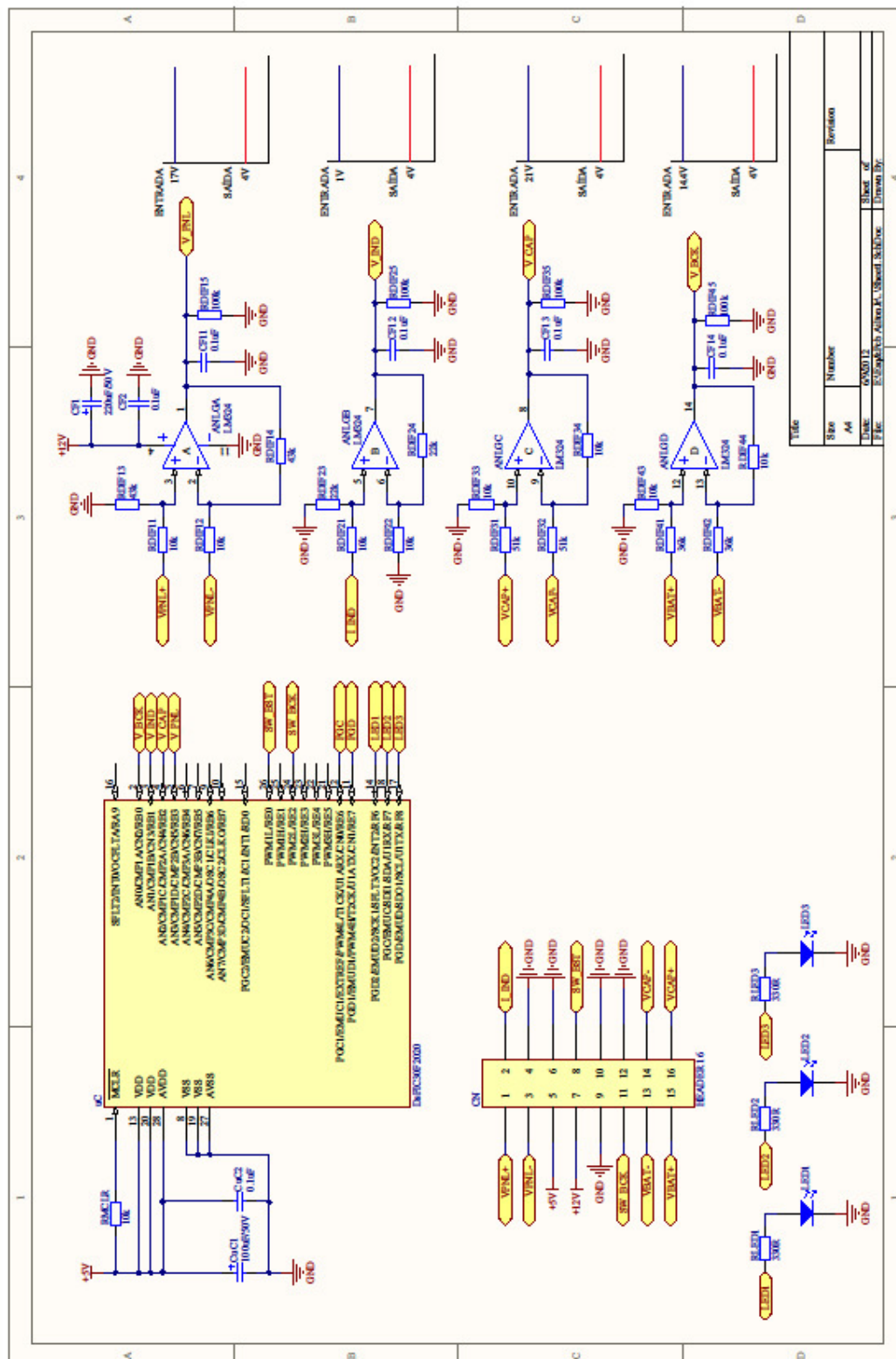
- [44] http://www.epcos.com/web/home/html/home_e.html, acesso em setembro 2012.
- [45] http://www.nec-tokin.net/now/english/product/pdf_dl/SuperCapacitors.pdf acesso em setembro/2012 acesso em setembro 2012.
- [46] <http://www.elna-america.com/dlc.htm> acesso em setembro 2012.
- [47] <http://www.avxcorp.com/docs/techinfo/bcapdim.pdf> acesso em setembro 2012.
- [48] <http://www.evanscap.com/MegaCap.pdf> acesso em setembro 2012
- [49] <http://www.panasonic.com/industrial/electronic-components/> acesso em outubro 2012.
- [50] <http://www.vina.co.kr>, acesso em agosto 2011.
- [51] <http://www.nesscap.com/>, acesso em outubro 2012.
- [52] <http://www.korchip.com/>, acesso em outubro 2012
- [53] <http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/dl.html>, acesso em outubro 2012.
- [54] <http://www.skeletontech.com/> acesso em outubro 2012.
- [55] <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/telefone.html>, acesso em outubro 2012.
- [56] JESZENSKY, Paul Jean Etienne. Sistemas telefônicos. Barueri, SP. Ed. Manole, 2004.
- [57] MIYOSHI, Edson Mitsugo; SANCHES, Carlos Alberto. Projetos de sistemas rádio. São Paulo: Érica, 2002.
- [58] Manual Técnico da ST&S. Rádio monocal 250 MHz/360 MHz sintetizado MC-25S, MC-36S, Rev. B, Agosto/2008.
- [59] Oliveira, E. F. de, “Conversor estático de baixo custo e alto rendimento para sistemas eólicos de pequeno porte”. Monografia. Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, 2010.
- [60] CASTELO BRANCO, P. T. V. “Sistema de energia elétrica portátil usando painel fotovoltaico para aplicação em *notebooks*”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2011.
- [61] THORNTON. Catálogo de fabricante. Disponível em: <<http://www.thornton.com.br/produtos/nee.htm>>. Acesso em Maio 2011.
- [62] MCLYMAN, C. Wim. T. *Transformer and Inductor Design Handbook*. Editora Marcel, Dekker, Inc. 2004.
- [63] Vorpérian, Vatché. *Simplified Analysis of PWM Converters using Model of PWM Switch – Part I: Continuous Current Mode*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics

Systems, vol. 26, no. 3, May 1990.

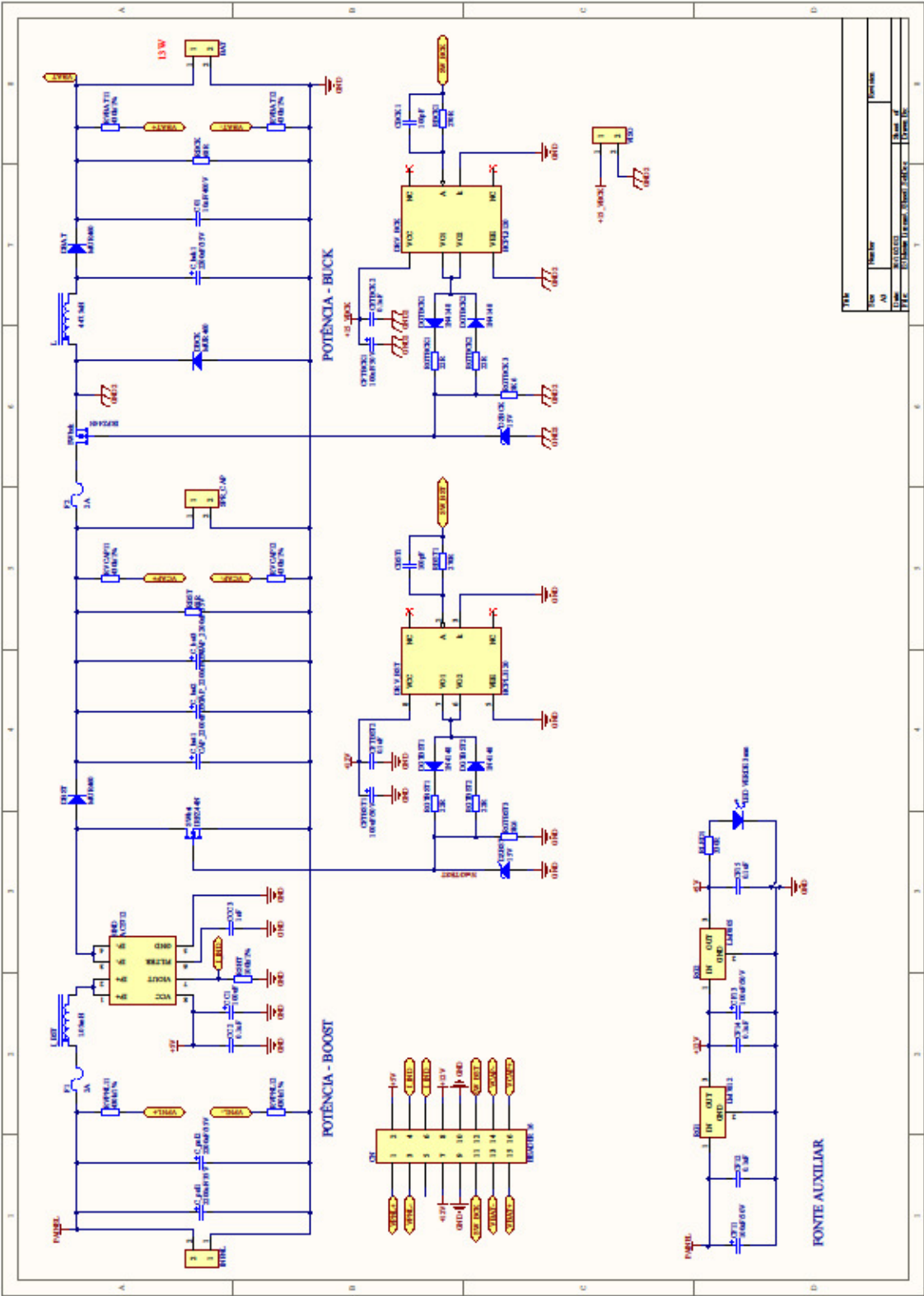
[64] Vorpérian, Vatché. *Simplified Analysis of PWM Converters using Model of PWM Switch – Part II: Discontinuous Current Mode*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. 26, no. 4, June 1990.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Esquemático do Circuito de Controle desenhado com o *software Altium*.



APÊNDICE B - Esquemático do circuito de potência e da fonte auxiliar.



APÊNDICE C - Esquemático do banco de ultracapacitores.

